

Preparação de trabalho e programação CAM para a maquinagem de componentes aeronáuticos

Tiago João Casal Ribeiro De Paiva

Dissertação para a obtenção do grau de mestre em
Engenharia mecânica

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista
Orientador: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa
Co-Orientador: Doutor Carlos Manuel Alves da Silva
Vogal: Prof. José Filipe Castanheira Pereira Antunes Simões

Outubro de 2013

Agradecimentos

Quero agradecer a todos os que contribuíram e tornaram possível a realização deste trabalho, em especial:

Ao meu orientador, Professor Pedro Rosa, por toda a orientação e conhecimentos transmitidos ao longo do meu percurso académico, em especial durante a realização desta dissertação;

Ao meu co-orientador, o Doutor Carlos Silva, por toda a orientação, disponibilidade e amizade demonstradas ao longo deste trabalho;

Ao mestre Ivo Bragança e ao mestre André Pereira por todo o apoio dado durante a realização do trabalho prático.

Ao técnico do NOF Flávio, por toda a ajuda no trabalho realizado no centro de maquinaria;

A todos os meus amigos, em especial à Rubina, à Sara, ao Amorim, ao Neves, ao Peras, ao Xico e ao Cereja pela paciência e pela amizade que demonstraram ao longo destes anos.

À minha família, em especial aos meus pais, pela educação que me deram e por estarem sempre presentes, nos bons e maus momentos;

E por último, mas não menos importante, por tudo, por existir, por me completar, à Sara...

Resumo

As operações de maquinagem são vastamente utilizadas na indústria aeronáutica, principalmente devido à dimensão reduzida dos lotes de fabrico, mas também devido à dificuldade de se obterem peças por deformação plástica nas ligas de alumínio aeronáutico de elevada resistência mecânica. Deste modo, a obtenção de componentes, estruturais ou não estruturais é feita através de operações de maquinagem.

Devido à complexidade desses componentes, não faz sentido, nem seria rentável, a sua obtenção por operações em máquinas convencionais. Assim sendo, a utilização de centros de maquinagem de comando numérico e *softwares* de CAM são essenciais.

Esta tese desenvolve-se no domínio da aprendizagem da utilização do *software* de CAM CATIA V5, bem como em todo o estudo de parâmetros e estratégias para a obtenção de componentes em alumínio 7050, com a melhor qualidade possível no menor tempo possível, de modo a tornar o processo mais rentável, reduzindo custos de operação.

Para tal, abordou-se em todo o enquadramento teórico os temas da seleção da melhor ferramenta, trajetórias de maquinagem, preparação de trabalho, modos de fresagem, fixação de ferramentas, materiais e revestimentos de ferramentas que melhor se adequam ao corte da liga de alumínio 7050 e respetivo desgaste e, posteriormente, no desenvolvimento experimental, o estudo dos parâmetros de corte e estudo dos tempos das trajetórias de maquinagem, que deveriam ser obtidas no menor tempo possível, com a melhor qualidade superficial possível.

O trabalho prático consistiu em programar as trajetórias de maquinagem referentes a essas duas geometrias, aplicando todos os conhecimentos adquiridos, e, após produção dessas geometrias, discutindo e sugerindo soluções para os defeitos encontrados, quer a nível da programação, quer a nível dos dispositivos de fixação.

O presente trabalho de mestrado permitiu a aquisição de conhecimentos na ótica da programação CAM em CATIA V5, bem como na aquisição de conhecimentos na maquinagem da liga de alumínio 7050.

Palavras chave

CAM

Catia V5

Maquinagem de peças aeronáuticas

Parâmetros de corte

Estratégias de maquinagem

Abstract

Machining operation are widely used in the aerospace industry, mainly due to small size of batches, but also due to the difficulty in obtaining parts from plastic deformation in high strength aeronautical aluminum alloys. Thus, obtaining components, structural or nonstructural, is made by machining operations.

Due to the complexity of those components, it would not make sense or be profitable to machine those components in conventional machines. So, the use of machining centers with numerical control and CAM software are essential.

This master thesis consists in learning how to use the CAM software CATIA V5 and also learn parameters and strategies to obtain aluminum 7050 parts with the best quality possible and in the smallest time possible, making the process more profitable, by reducing costs with the operations.

So, it was dealt throughout the theoretical issues, selection of the best tool, best machining path , job preparation, milling modes, fixing tools, materials and coatings for tools that are best suited to cutting aluminum alloy 7050 and respective wear and later in the experimental development, the study of cutting parameters and study of times of machining paths, so it was possible to obtain two geometries, that should be obtained in the minimum time possible and with the best surface quality possible.

The practical work was to program the machining paths related to these two geometries, applying all the knowledge acquired, and after production of these geometries, discussing existing errors and also giving solutions to solve them for both programing and fixing devices.

This master thesis enabled the acquisition of knowledge in CAM programing in CATIA V5 software and also in the acquisition of knowledge in machining aluminum 7050 alloy.

Key words

CAM

Catia V5

Aeronautical parts machining

Cutting parameters

Machining strategies

Índice

Introdução	1
1. Pesquisa bibliográfica	3
1.1 Maquinagem de componentes aeronáuticos	3
1.2 Tecnologia da fresagem.....	3
1.2.1 Tipos de fresagem	3
1.2.2 Tipos de ferramentas e suas especificidades.	9
1.2.3 Materiais, revestimentos e desempenho das ferramentas.....	11
1.3 Trajetórias de maquinagem	18
1.4 Preparação de trabalho.....	19
2. Programação CAD/CAM.....	24
2.1 Abertura de caixa	27
2.2 Facejamento	29
2.3 Desbaste (<i>Roughing</i>)	32
2.4 <i>Sweeping</i>	33
2.5 <i>Isoparametric machining</i> (contorneamento).....	35
3. Desenvolvimento experimental.....	37
3.1 Aparato experimental	37
3.2 Materiais e método	37
3.3 Preparação de trabalho.....	43
3.4 Plano de ensaios.....	47
4. Resultados e discussão	48
4.1 Influência das geometrias na programação	48
4.2 Avaliação das metodologias e preparação de trabalho	56
5. Conclusões e trabalho futuro.....	58
Trabalho futuro.....	64
6. Referências Bibliográficas	65
7. Anexos.....	1
Anexo 1	1
Anexo 2	8
Anexo 3	9
Anexo 4	12
Anexo 5	13

Índice de figuras

Figura 1: Tipos de fresagem [15]	4
Figura 2: Tipos de fresagem [15]	5
Figura 3: Modos de fresagem [15]	5
Figura 4: Tipos de fresas e corte que podem efetuar [15]	6
Figura 5: Número de arestas de corte [15]	7
Figura 6: Forças na fresa [15]	7
Figura 7: Velocidades de corte típicas para vários materiais e suas combinações para várias operações de corte, em m/min	9
Figura 8: Tipos de fresas de topo [15]	10
Figura 9: Diâmetro operacional: representação esquemática [15]	10
Figura 10: Determinação da altura da cúspide [15]	11
Figura 11: Evolução da dureza dos materiais para ferramentas em função da temperatura e em função da resistência mecânica	12
Figura 12: Relação entre dureza e resistência mecânica de materiais típicos para ferramentas de corte [6]	13
Figura 13: Variação dos vários parâmetros para os vários revestimentos [10]	14
Figura 14: Regimes de corte para ferramentas PCD [6]	15
Figura 15: Tipos de materiais de ferramentas e suas adequabilidades para o corte de diversos materiais. [9]	16
Figura 16: Desgaste linear verificado para ferramentas revestidas e não revestidas [12]	17
Figura 17: Resultados obtidos para a vida da ferramenta [13]	18
Figura 18: Grampos e prensa mecânica	21
Figura 19: Diagrama de decisão baseado nas tecnologias de grupo	22
Figura 20: Tipos de fixação de fresas [16]	23
Figura 21: Esquema de funcionamento do procedimento de programação CAM [6]	24
Figura 22: Esquema de funcionamento do CATIA desde a concepção ao fabrico de um componente	25
Figura 23: Exemplo de código APT e código NC gerado	26
Figura 24: Esquema conceptual de procedimento a seguir para a obtenção de peças aeronáuticas	26
Figura 25: Geometria idealizada para otimização do processo de abertura de caixa	27
Figura 26: Simulação do processo de abertura de caixa	28
Figura 27: Tempos obtidos para as várias trajetórias	28
Figura 28: Variação da taxa de remoção de material e da rugosidade teórica em função do avanço (<i>outward helical</i>)	29
Figura 29: Geometria de teste para a operação de facejamento	30
Figura 30: Simulação do processo de facejamento	30
Figura 31: Tempos obtidos para as diferentes trajetórias testadas	31
Figura 32: Variação da taxa de remoção de material e da rugosidade teórica em função do avanço	31
Figura 33: Geometria de teste	32
Figura 34: Tempos obtidos para as várias trajetórias	33
Figura 35: Tempos obtidos para as várias trajetórias	34

Figura 36: Variação da taxa de remoção de material e da rugosidade teórica com o avanço..	34
Figura 37: Geometria de teste para a operação	35
Figura 38: Tempos obtidos para as várias trajetórias.....	36
Figura 39: Centro de maquinagem DMU 50 Eco e respetivo controlador.....	37
Figura 40: Ferramentas e suas geometrias de corte típicas	38
Figura 41: Gráfico da evolução do avanço com o diâmetro da ferramenta	39
Figura 42: Variação do avanço em função do diâmetro da ferramenta, para várias velocidades de corte recomendadas	40
Figura 43: Ferramentas a utilizar na produção das geometrias.....	41
Figura 44 : Metodologia de plano de trabalho sugerida.....	44
Figura 45: Brutos maquinados	46
Figura 46: Geometrias a maquinar	47
Figura 47: Sulco deixado aquando da fratura da ferramenta	49
Figura 48: Novo aperto do bruto de maquinagem (à esquerda) e Roca utilizada para desbaste (à direita)	49
Figura 49: Geometria obtida à saída do centro de maquinagem	50
Figura 50: Acabamento da peça	50
Figura 51: Peça obtida.....	50
Figura 52: Estágios da produção da geometria 2	51
Figura 53: Redução do avanço na operação de abertura de caixa.....	52
Figura 54: Localização da parede destruída	52
Figura 55: Desbaste da base da peça em fresadora convencional.....	53
Figura 56: Geometria final obtida	53
Figura 59: Novo aperto do bruto de maquinagem e marcas deixadas pela vibração da ferramenta.....	58
Figura 60: Marcas deixadas pela operação de acabamento nas paredes diagonais.....	59
Figura 61: Alteração do passo longitudinal da ferramenta	59
Figura 62: Marca deixada durante a operação de acabamento.....	60
Figura 63: Mau acabamento deixado na peça pela operação de <i>plunge milling</i>	61
Figura 64: Defeitos deixados na peça devido à inclinação das paredes.....	61
Figura 65: Inclusão de orelhas furadas na peça.....	62
Figura 66: Diagrama de decisão da preparação de trabalho quantificado.....	63
Figura 67: Menu de definição de hardware.....	1
Figura 68: Seleção de uma fresadora de três eixos	1
Figura 69: Definição do controlador, bem como da biblioteca de pés processador e tipo de ficheiro NC.....	2
Figura 70: Definição da peça e do bruto de maquinagem.....	2
Figura 71: Geometria a maquinar.....	3
Figura 72: à esquerda, ícone de facejamento; á direita, menu interativo da operação de facejamento	3
Figura 73: Trajetórias de maquinagem geradas pelo programa para a operação de facejamento	4
Figura 74: Operação de facejamento selecionada	4
Figura 75: Ícone da operação de desbaste e respetivo menu.....	4

Figura 76: Trajetórias calculadas para a operação de desbaste	5
Figura 77: Ícone de abertura de caixa e respetivo menu interativo	5
Figura 78: Trajetórias de maquinagem da operação de abertura de caixa	6
Figura 79: Ícone de furação e menu interativo.....	6
Figura 80: Trajetória calculada para o furo	7
Figura 81: Menu de geração de código NC.....	7
Figura 82: Exemplo de seleção de operação	8
Figura 83: Icon de instrução de pós processador	8
Figura 84: Instruções típicas para serem escritas em ficheiros pós processados (à esquerda, comentário; ao centro, liga refrigeração; à direita, força ferramenta a ser arrumada no fim do programa)	8
Figura 85:Menu do processo e opções apresentadas.....	9
Figura 86: Definição de nível de segurança e definição da velocidade de aproximação.....	9
Figura 87: Seleção da trajetória em rampa e definição dos seus parâmetros	10
Figura 88: Definição dos brutos para fixação em prensa, fixação por adesivo e fixação por ligação aparafusada	14
Figura 89: Definição dos brutos para fixação em prensa, fixação por adesivo e fixação por ligação aparafusada	15

Índice de tabelas

Tabela 1: Relação entre altura de cúspide e rugosidade superficial [15]	11
Tabela 2: Revestimentos e materiais por eles maquináveis	13
Tabela 3: Características da ferramenta utilizada	27
Tabela 4: Parâmetros utilizados	27
Tabela 5: Características da ferramenta	30
Tabela 6: Parâmetros de corte utilizados.....	30
Tabela 7: Características da ferramenta	32
Tabela 8: Parâmetros utilizados	32
Tabela 9: características da ferramenta	33
Tabela 10: Parâmetros utilizados	33
Tabela 11: Características da ferramenta	35
Tabela 12: Parâmetros de corte utilizados.....	35
Tabela 13: Quadro resumo das trajetórias de maquinagem	36
Tabela 14: Características do centro de maquinagem.....	37
Tabela 15: Lista de ferramentas indicadas para o corte de alumínio e respetiva gama de diâmetros	38
Tabela 16: Variação do avanço por dente com o diâmetro e tipo da ferramenta (desbaste)....	39
Tabela 17: Variação do avanço por dente com o diâmetro e tipo de ferramenta (acabamento)	39
Tabela 18: Variação da velocidade de corte e da profundidade de corte, consoante a ferramenta.....	40
Tabela 19: Sequência de operações e respetivos parâmetros de maquinagem e tempos da simulação.....	41
Tabela 20: Tabela de ferramentas do aperto em CNC	42
Tabela 21: Sequência de operações em desbaste pesado	42
Tabela 22: Sequência de operações em desbaste ligeiro.....	42
Tabela 23: Sequência de operações na operação de acabamento.....	43
Tabela 24: Ficha de ferramentas para os apertos em CNC	43
Tabela 25: Sequência de apertos para a fixação do bruto de maquinagem por prensa mecânica	44
Tabela 26: Sequência de apertos para a fixação do bruto de maquinagem recorrendo a adesivos	45
Tabela 27: Sequência de apertos para a fixação do bruto de maquinagem recorrendo a ligações aparafusadas ou pinças de aperto	45
Tabela 28: Análise SWOT das várias soluções propostas	45
Tabela 29: Composição química da liga de alumínio 7050 [4].....	12
Tabela 30: Propriedades mecânicas da liga 7050 [4].....	12

Abreviaturas

CAD: *computer assisted design*

CAM : *Computer aided manufacturing*

NC: *numerical comand*

CNC: *Computer numeral control*

APT: *Automatically Programmed Tool*

JS: *Jabro Solid*

V_c : velocidade de corte

P_c : Profundidade de corte

a_z : Avanço por dente

V_a : Velocidade de avanço

CATIA: *Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive*

Introdução

As operações de maquinagem são vastamente utilizadas na indústria aeronáutica, principalmente devido à dimensão reduzida dos lotes de fabrico, mas também devido à dificuldade de se obterem peças por deformação plástica nas ligas de alumínio de elevada resistência mecânica. Deste modo, a obtenção de componentes, estruturais ou não estruturais é feita através de operações de maquinagem. Devido à complexidade desses componentes, não faz sentido, nem seria rentável, a sua obtenção por operações em máquinas convencionais. Assim sendo, a utilização de centros de maquinagem de comando numérico e *softwares* de CAM são essenciais.

O projeto de novos equipamentos e componentes é feito através da utilização de *softwares* de desenho assistido por computador (CAD), sendo que o mais utilizado nesta indústria é o CATIA. Este último permite uma aceleração no projeto com redução de custos associada. Após a fase de conceção e projeto, há que passar ao fabrico dos vários componentes que compõem o equipamento projetado.

Na indústria aeronáutica encontramos uma abordagem conservadora no sentido em que recorre-se ao *software* de CAD, utilizado no projeto de componentes, para fazer o CAM. A utilização do mesmo *software* prende-se com o receio da perda de informação aquando da conversão para outro formato, para que possa ser lido por *softwares* especializados em CAM. Por sua vez, o *software* CATIA permite a realização quer do CAD quer do CAM, sendo por isso, o *software* de eleição da indústria mencionada.

Esta tese desenvolve-se no domínio da aprendizagem da utilização do *software* de CAM CATIA V5, bem como em todo o estudo de parâmetros e estratégias para a obtenção de componentes em alumínio 7050, com a melhor qualidade possível no menor tempo, de modo a tornar o processo mais rentável, reduzindo por sua vez custos de operação. Para tal estudou-se a influência das trajetórias de maquinagem nos tempos, bem como a influência dos dispositivos de fixação e sua construção, para a obtenção com sucesso dos componentes pretendidos.

Para tal, abordou-se em todo o enquadramento teórico os temas da seleção da melhor ferramenta, trajetórias de maquinagem, preparação de trabalho, modos de fresagem, fixação de ferramentas, materiais e revestimentos de ferramentas que melhor se adequam ao corte da liga de alumínio 7050 e respetivo desgaste e, posteriormente, no desenvolvimento experimental, o estudo dos parâmetros de corte e estudo dos tempos das trajetórias de maquinagem, de modo a que fosse possível obter duas, com a melhor qualidade superficial possível.

O trabalho prático consistiu em programar as trajetórias de maquinagem referentes a essas duas geometrias, aplicando todos os conhecimentos adquiridos, e, após produção

dessas geometrias, discutindo e sugerindo soluções para os defeitos encontrados, quer a nível da programação, quer a nível dos dispositivos de fixação.

A presente tese de mestrado encontra-se organizada em 5 capítulos, incluindo a presente introdução, uma conclusão e anexos.

O capítulo 2, sendo um capítulo de pesquisa bibliográfica, aborda o tema da tecnologia da fresagem, das trajetórias de maquinagem e da preparação de trabalho

O capítulo 3 trata do tema da programação CAD/CAM, referindo o fluxo de procedimentos do processo, bem como o tipo de trajetórias de maquinagem e sua escolha.

No capítulo 4 encontra-se o desenvolvimento experimental, nomeadamente, o estudo dos parâmetros de corte a serem maquinadas, bem como a seleção dos dispositivos de fixação da matéria-prima para a obtenção dessas peças e as ferramentas a serem utilizadas para a obtenção dessas mesmas peças.

No capítulo 5 discute-se os resultados experimentais obtidos, nomeadamente no sucesso da obtenção das peças.

O capítulo 6 traz-nos as conclusões do trabalho e as perspectivas de trabalho futuro que dele advém.

1. Pesquisa bibliográfica

1.1 Maquinagem de componentes aeronáuticos

Devido à dimensão reduzida dos lotes de fabrico que se verifica na indústria aeronáutica, torna-se lógico o fabrico dos variados componentes por operações de maquinagem. As operações de maquinagem permitem, por remoção sucessiva de material sob a forma de aparas, obter peças cuja geometria é complexa, com bom acabamento superficial e boas tolerâncias dimensionais.

Devido à complexidade típica das peças aeronáuticas, é comum a utilização de *softwares* de CAM, que por sua vez, permitem fabricar essas peças recorrendo a programação gráfica e intuitiva, gerando um código que as máquinas ferramenta de comando numérico consigam ler e executar.

O material de eleição para o fabrico de componentes aeronáuticos é o alumínio (e suas ligas). Esta escolha deve-se essencialmente à sua baixa densidade e boa relação resistência mecânica/peso, condição necessária a esta indústria. A utilização deste material conduz a algumas dificuldades no seu processamento por operações de maquinagem, dado que, devido ao seu baixo ponto de fusão, torna muito fácil a formação de arestas postizas de corte, sendo pois necessário o ajuste dos parâmetros para que este fenómeno não ocorra ou que seja minimizado.

Outra característica dos componentes aeronáuticos prende-se com o facto de apresentarem dimensões elevadas aliadas a paredes com espessura reduzida e altura elevada. Este facto adiciona uma dificuldade ao processo de maquinagem dado que a interação da ferramenta com o material, associada à baixa espessura das paredes das peças, promove o aparecimento de empenos nas peças, que irão prejudicar o rigor dimensional dos componentes produzidos. Deste modo, para além do correto ajuste dos parâmetros, ainda deverão ser idealizados métodos de fixação e métodos de produção desses componentes, de forma a minimizar o empeno do componente final.

1.2 Tecnologia da fresagem

1.2.1 Tipos de fresagem

Fresagem é o processo de geração de superfícies maquinadas, por remoção progressiva de material a uma taxa de movimento ou avanço relativamente baixa, quando comparada com a velocidade de rotação da fresa.

Este processo implica movimento relativo entre a ferramenta e a peça, ferramenta essa, que por sua vez, se encontra em rotação [5].

Existem três tipos fresagem: fresagem periférica (A), fresagem de topo (B), e fresagem frontal (C) representadas na seguinte figura:

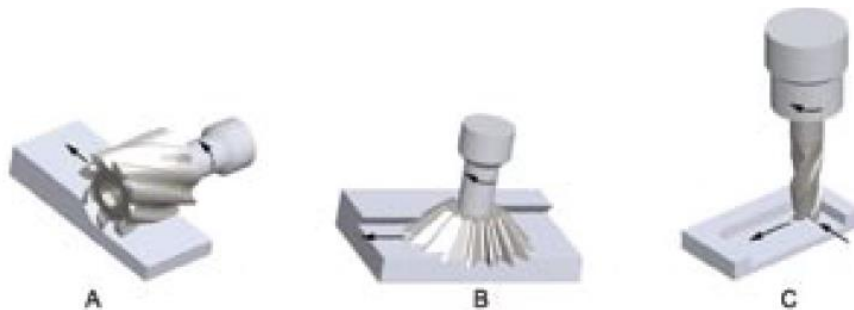


Figura 1: Tipos de fresagem [15]

Na fresagem periférica, o eixo de rotação da fresa é paralelo à superfície da peça maquinada. Esta superfície resulta da ação das arestas de corte localizadas na periferia da fresa [15]. Na fresagem de topo e periférica, a fresa gira num eixo perpendicular à superfície da peça, sendo que as arestas de corte se encontram na periferia da fresa [15].

Atualmente, as fresadoras tradicionais têm vindo a ser substituídas por centros de maquinagem operados por comando numérico, onde se destacam a obtenção de formas extremamente complexas, obtidas com elevada precisão e com tempos de maquinagem substancialmente inferiores, quando comparados com máquinas convencionais. Não obstante, e apesar da sua enorme versatilidade, estes centros de maquinagem não devem permanecer muito tempo sem estarem em operação, uma vez que são muito dispendiosos, correndo o risco de não haver retorno do investimento feito na sua própria aquisição. Estes poderão estar equipados com 3, 4 ou 5 eixos. Quanto maior o número de eixos da máquina, maior a sua versatilidade, no entanto, um maior número de eixos implicará um maior custo de aquisição do equipamento. Por este motivo, a escolha do número dos mesmos deverá ser ponderada através das peças a maquinar, bem como da precisão e tolerâncias destas últimas.

Tipicamente, para o fabrico de componentes aeronáuticos é utilizada a fresagem de topo, podendo distinguir-se as seguintes operações dentro deste tipo de fresagem:

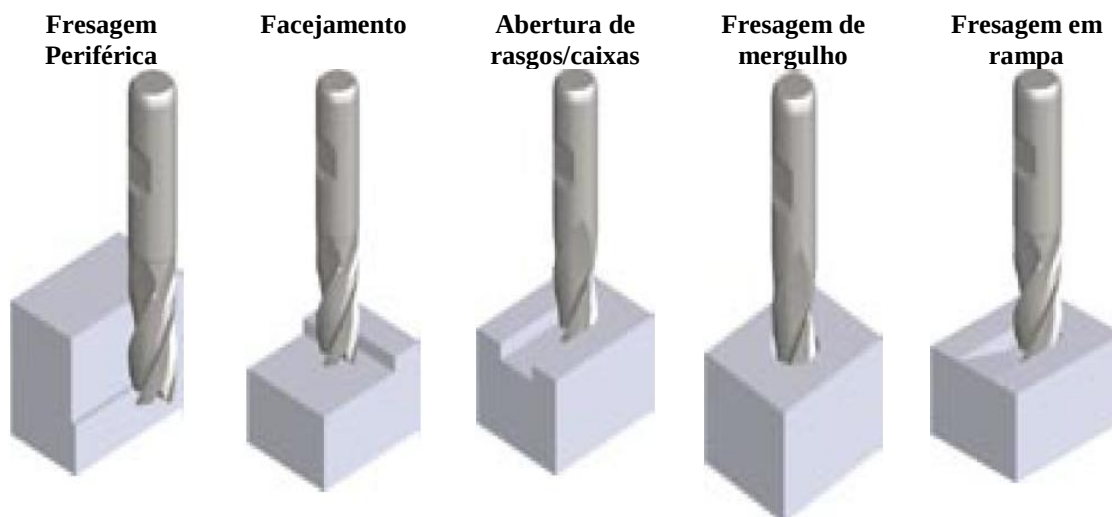


Figura 2: Tipos de fresagem [15]

No que diz respeito à figura 2, pode afirmar-se que, no caso da fresagem periférica, a profundidade de corte deverá ser inferior a 25% do diâmetro da fresa. Nas operações de facejamento e abertura de caixa, o valor da profundidade de corte não é tão rigoroso, sendo que poderá ser de 90% ou 100% do diâmetro da fresa, respetivamente. Para operações de fresagem de mergulho, o valor máximo da profundidade de corte não deverá exceder os 50% do diâmetro da fresa.

Ainda dentro deste tipo de fresagem, distinguem-se dois tipos, que se prendem com a relação entre a direção do avanço e o sentido de rotação da ferramenta. Assim, temos a fresagem ascendente (ou “no sentido do avanço”), que ocorre quando a rotação da ferramenta se dá no mesmo sentido do avanço – caso A e a fresagem convencional (também denominada por “sentido contrário do avanço”), que sucede quando a rotação da ferramenta se dá no sentido oposto ao do avanço - caso B



Figura 3: Modos de fresagem [15]

Ambos os modos de fresagem apresentam vantagens e desvantagens, sendo que a sua utilização encontra-se relacionada com o tipo de operação a realizar e com o tipo de máquina ferramenta que executa a operação de maquinagem. No que diz respeito à fresagem convencional, esta não depende do estado da superfície da peça, sendo o processo de corte mais suave. Outra vantagem é a não dependência da vida da ferramenta por defeitos superficiais ou contaminações. Por outro lado, a utilização deste modo de

fresagem aumenta a tendência da ferramenta trepidar e a peça tem tendência a ser puxada para cima, havendo a necessidade de uma boa fixação desta. Também o desgaste é mais acentuado, e é necessário uma maior potência de corte, de modo a compensar o roçamento inicial aquando do corte da espessura mínima, prejudicando o acabamento superficial. Quanto à fresagem ascendente, a força de corte é no sentido de empurrar a peça contra o dispositivo de fixação, mantendo-a no seu lugar. Um menor desgaste da ferramenta e um melhor acabamento superficial são outras vantagens da utilização deste modo de fresagem. Devido ao avanço se dar no sentido contrário da rotação da ferramenta, deve-se acautelar a eliminação das folgas, através de dispositivos apropriados. Também se verifica um desgaste abrasivo acentuado, pelo que se deve preparar a superfície a maquinar.

1.2.2 Seleção de ferramentas e parâmetros de corte

Antes de se dar início à maquinagem de um componente, deverão ser tomadas várias decisões relativamente à ferramenta e ao processo de corte, nomeadamente [15] a fresa mais adequada, assim como os parâmetros de corte que permitam uma mais fácil e rápida remoção de material, aliada a uma vida prolongada da ferramenta.

A seleção da ferramenta deverá ser feita tendo em conta alguns fatores, tais como a escolha duma ferramenta com o maior diâmetro e rigidez possíveis para a realização da operação, bem como com o menor comprimento em balanço que a operação permita [15]. Outro aspeto a ter em atenção prende-se com as arestas de corte da fresa. Neste sentido, podem distinguir-se dois tipos de fresa cujas funções estão perçetíveis na figura seguinte:

Com corte ao centro	Sem corte ao centro
	

Figura 4: Tipos de fresas e corte que podem efetuar [15]

Relativamente à figura 4, verifica-se que as fresas com corte ao centro permitem operações de abertura de caixa, furação e mergulho enquanto que as fresas sem corte ao centro apenas permitem operações periféricas e de abertura de rasgos.

Para além da disposição das arestas de corte, também o seu número tem influência no processo:

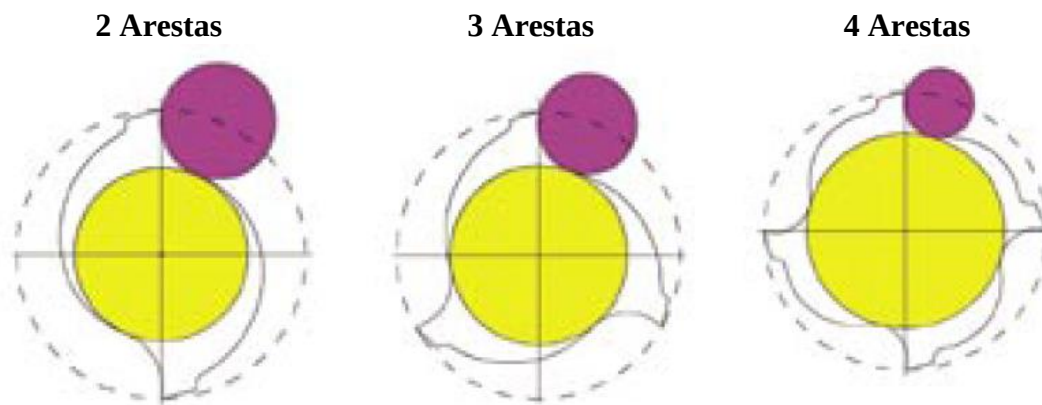


Figura 5: Número de arestas de corte [15]

A figura 5 mostra três ferramentas com menor e maior número de arestas de corte. O aumento do número das arestas de corte aumenta a resistência à flexão da fresa, diminuindo-se, no entanto, o espaço para as aparas cortadas serem escoadas. Deste modo, um menor número de arestas de corte é indicado para operações de desbaste, dado que permite o escoamento de aparas de dimensão superior, aumentando a taxa de remoção de material. No entanto, a qualidade superficial obtida vem prejudicada. Assim, para operações de acabamento, deverá usar-se o maior número de arestas de corte possíveis. Assim, apesar de o tamanho da avara ter de ser reduzido, é possível obter-se melhores acabamentos superficiais.

Por último, o quarto fator diz respeito ao ângulo da hélice. O aumento do número de canais torna a carga nas faces individuais mais homogênea e, conseqüentemente permite melhores acabamentos. No entanto, ângulos de hélice elevados promovem um aumento da carga vertical, F_v , ao longo do eixo da fresa, originando problemas de carga nas chumaceiras do eixo da máquina bem como deslocamento da fresa ao longo do eixo do fuso.



Figura 6: Forças na fresa [15]

No que diz respeito aos parâmetros de corte (velocidade de corte e de avanço), estes só poderão ser determinados quando se conhece o material a maquinar, o material da ferramenta, a potência disponível para realizar a operação e o tipo de acabamento pretendido. Conhecidos estes fatores, as equações que se seguem permitem o cálculo dos parâmetros, para que os mesmos possam ser introduzidos no *software* de CAM [5].

- 1) Taxa de remoção de material (MRR), que permite calcular o volume de material removido:

$$MRR = W \cdot H \cdot f \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

MRR: Taxa de remoção de material [mm³/min];

W: Largura da apara [mm];

H: Profundidade de corte [mm];

f: velocidade de avanço [mm/min]

- 2) Velocidade de avanço:

$$f = F_t \cdot N \cdot C_{RPM} \quad \text{Equação 2}$$

Em que,

f: velocidade de avanço [mm]

F_t: Avanço por dente [mm/N]

N: número de dentes;

C_{RPM}: Velocidade de rotação da bucha.

- 3) Rugosidade teórica: O valor da rugosidade teórica poderá ser obtido através da seguinte expressão:

$$R_a = \frac{a_z^2}{32 \left[R \pm \frac{a_z Z}{2\pi} \right]} \quad [7] \quad \text{(fresagem periférica ou cilíndrica)} \quad \text{Equação 3}$$

$$R_a = \frac{a_z^2}{32r} \quad [7] \quad \text{(fresagem de topo)} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

R_a: Valor da rugosidade aritmética teórica [mm];

a_z: Avanço por dente [mm];

R: Raio da fresa [mm];

Z: Número de dentes da fresa.

r: raio de bico da fresa

Este valor teórico tem especial importância quando é necessário, por imposição de projeto, um valor específico de rugosidade superficial.

- 4) Velocidade de corte, ou seja, a velocidade linear resultante da rotação da ferramenta:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot C_{RPM}}{1000} \quad \text{Equação 5}$$

Em que,

V_c : velocidade de corte [m/min];

D: Diâmetro da ferramenta [mm];

C_{RPM} : Velocidade de rotação da bucha.

A figura seguinte mostra valores típicos de velocidades de corte para vários materiais de engenharia e combinações de velocidade de corte para várias operações:

Material	High-speed steel tools	
	Rough	Finish
Cast iron.....	50 - 60	80 - 110
Semisteel.....	40 - 50	65 - 90
Malleable iron.....	80 - 100	110 - 130
Cast steel.....	45 - 60	70 - 90
Copper.....	100 - 150	150 - 200
Brass.....	200 - 300	200 - 300
Bronze.....	100 - 150	150 - 180
Aluminum.....	400 - 450	700 - 750
* Magnesium.....	600 - 800	1,000 - 1,500
SAE steels:		
1020 (coarse feed), low-carbon.....	60 - 80	60 - 80
1020 (fine feed), low-carbon.....	100 - 120	100 - 120
1035, medium-carbon.....	75 - 90	90 - 120
1330, alloy steel.....	90 - 110	90 - 110
1050, Med-high-carbon.....	60 - 80	100 - 125
2315, nickel steel.....	90 - 110	90 - 110
3150, nickel-chromium.....	50 - 60	70 - 90
4150, chrome-molybdenum.....	40 - 50	70 - 90
4340, nickel-chrome-molybdenum..	40 - 50	60 - 70
Stainless steel.....	60 - 80	100 - 120
Titanium, hard alloy.....	80 - 100	110 - 130

-GENERAL APPLICATIONS FOR CUTTING CONDITIONS-		
CONDITION	-SPEED-	-FEED-
Roughing	↙	↗
Finishing	↗	↙
End Milling	↗	↙
Slotting	↗	↙
Hard Material	↙	↘
Soft Material	↗	↗
Scale	↙	↗
Tool Life	↙	↘
Heavy d.o.c.	↙	↙

Higher- ↗
 Lower- ↙
 Same- ↘

Figura 7: Velocidades de corte típicas para vários materiais e suas combinações para várias operações de corte, em m/min

1.2.2 Tipos de ferramentas e suas especificidades.

Existem no mercado variados grupos de ferramentas para fresagem de topo. Dentro do grupo das fresas de topo existem as de topo plano, de topo plano boleado e de ponta esférica, em que cada uma delas permite diferentes tipos de corte.

Fresas de Topo	Fresas de Topo Esférico	Fresas de Topo com Raio
		
Estas fresas de topo têm um ângulo reto na extremidade da fresa.	A forma nos extremos das fresas é uma semi-esfera.	Estas fresas de topo têm um pequeno raio na extremidade em vez de uma aresta em esquadro.

Figura 8: Tipos de fresas de topo [15]

Ao passo que o que as fresas de topo plano permitem obter faces perpendiculares, as fresas de topo plano boleado e as fresas de ponta esférica permitem obter superfícies boleadas cujo raio é o raio de bico da própria fresa.

Para efeitos de cálculo, as duas primeiras fresas regem-se pelas equações apresentadas anteriormente (ponto 1.2.2. Seleção de ferramentas e parâmetros de corte). Já as fresas de ponta esférica são um caso particular, sendo necessário realizar algumas correções às mesmas expressões. Este tipo de fresas distingue-se das fresas de topo, dado que não é o seu diâmetro que é tido em conta para o cálculo da velocidade de corte, mas sim o seu diâmetro operacional. Por sua vez, este é definido como o diâmetro real da fresa na linha de profundidade de corte axial, sendo afetado por dois parâmetros: O diâmetro da ferramenta e a profundidade de corte axial [15].

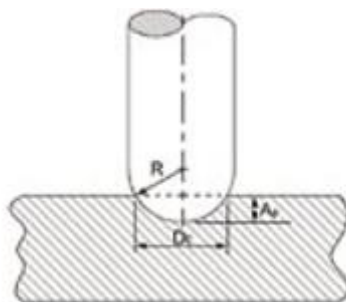


Figura 9:Diâmetro operacional: representação esquemática [15]

A figura 10 permite determinar o diâmetro operacional como:

$$D_E = 2\sqrt{R^2 - (R - A_p)^2} \quad \text{Equação 6}$$

A velocidade de corte pode então ser calculada com base na equação 5, em que o diâmetro da fresa é substituído pelo diâmetro operacional. A utilização deste tipo de fresas leva a que, quando se maquina uma superfície com um padrão em zig-zag, seja deixada

nessa superfície um excedente de material, designado de cúspide. A altura dessas cúspides está relacionada com a rugosidade superficial.

A figura seguinte mostra como é determinada a altura da cúspide:

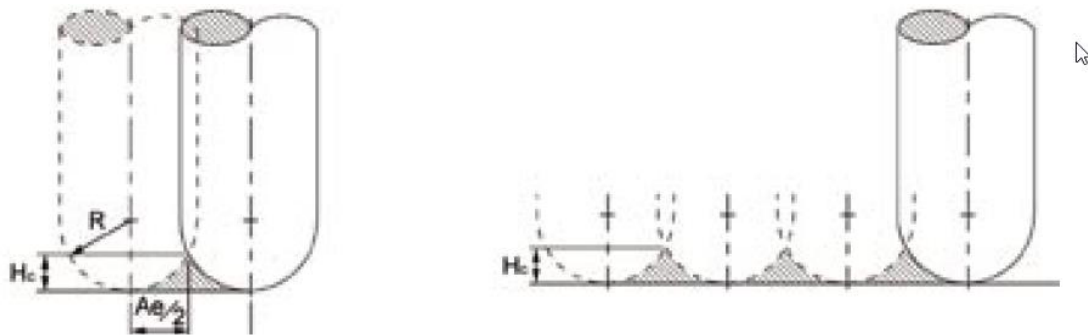


Figura 10: Determinação da altura da cúspide [15]

A altura da cúspide pode então ser determinada por:

$$H_c = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{A_e}{2}\right)^2} \quad \text{Equação 7}$$

Em que,

H_c =altura da cúspide;

R =Raio da ponta da ferramenta;

A_e =Valor da sobreposição entre duas passagens.

A tabela seguinte relaciona os valores da altura da cúspide com os valores de rugosidade superficial:

Tabela 1: Relação entre altura de cúspide e rugosidade superficial [15]

$H_c (\mu m)$	0,2	0,4	0,7	1,25	2,2	4	8	12,5	25	32	50	63	100
$R_A (\mu m)$	0,03	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	8	12,5	16	25

A tabela 1 demonstra que a altura da cúspide e a rugosidade superficial são proporcionais, isto é, quando uma aumenta, a outra aumenta também. Ambos os parâmetros estão relacionados com o avanço da ferramenta, pelo que faz sentido que estes estejam relacionados.

1.2.3 Materiais, revestimentos e desempenho das ferramentas

As ferramentas utilizadas atualmente na indústria são de natureza variada, que vão desde aços rápidos até materiais cerâmicos ou diamante.

Para a definição da ferramenta distinguem-se três propriedades distintas [6]: a dureza da ferramenta, a resistência mecânica e a resistência ao desgaste.

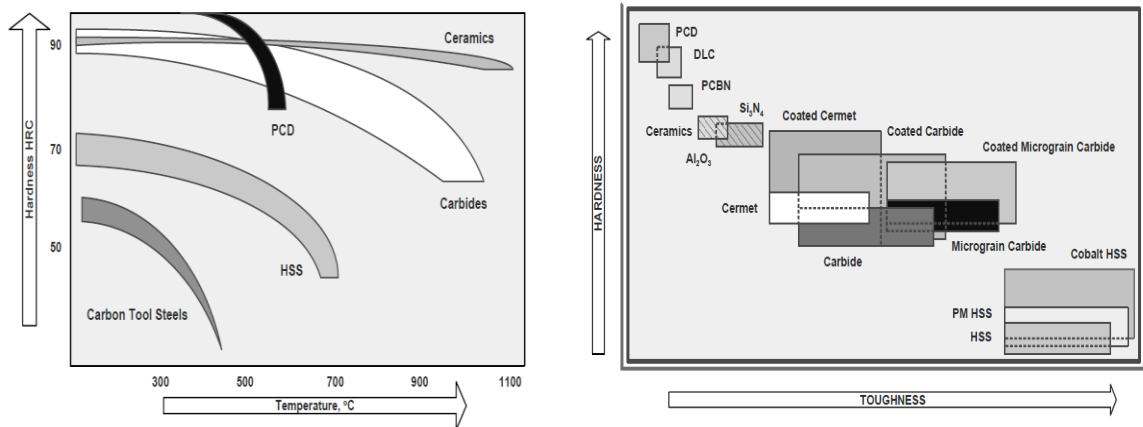


Figura 11: Evolução da dureza dos materiais para ferramentas em função da temperatura e em função da resistência mecânica

A figura 11 torna evidente a variação da dureza dos materiais das ferramentas, quando a temperatura aumenta. O aumento da temperatura é um fenómeno natural nas operações de maquinagem, não só devido ao atrito entre o material da peça e a ferramenta mas também devido à energia dissipada na deformação plástica. Assim, o aumento da temperatura é um fenómeno incontornável e que, leva à degradação das ferramentas, evidenciado pela diminuição da dureza destas.

A figura 11 também mostra que quando se aumenta a dureza, reduz-se a resistência mecânica do material (e vice-versa). Neste sentido, temos assistido a uma tendência na evolução das ferramentas de corte, onde se mantém a sua dureza elevada, ao mesmo tempo que é aumentada a sua resistência mecânica.

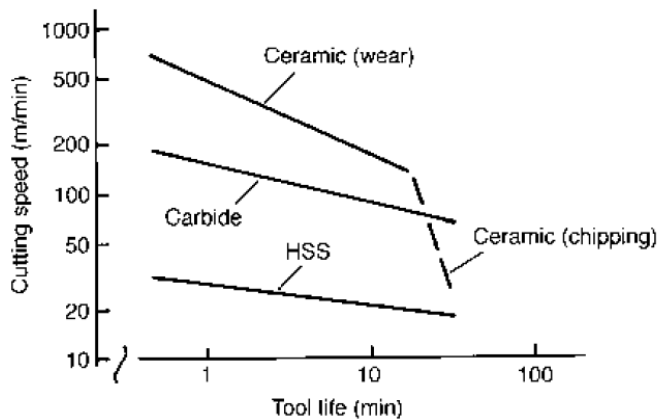
Como já foi referido, a dureza é uma das principais características das ferramentas de corte. Se a taxa de remoção de material que pode ser alcançada pela ferramenta é limitada pela sua dureza, então, logicamente, ferramentas com uma maior dureza terão maiores produtividades [9]. Deste modo, ferramentas de aço rápido (HSS) terão uma menor produtividade quando comparadas com ferramentas de carbonetos. Por sua vez, estas terão uma menor produtividade quando comparadas com ferramentas cerâmicas.

As ferramentas, apesar da sua elevada dureza, apresentam desgaste. As causas desse desgaste são complexas e não serão aqui abordadas. No entanto, como breve referência, pode ser utilizada a lei de Taylor para determinação da vida da ferramenta. Este parâmetro é importante dado que tem sérias implicações na produtividade do processo de maquinagem [9]. Por exemplo, uma ferramenta que é trocada frequentemente devido ao seu desgaste imputa um tempo adicional à operação, que é o tempo da troca de ferramenta, aumentando o tempo total para a obtenção de um componente.

A lei de Taylor relaciona a vida da ferramenta, T , com a velocidade de corte, V , de acordo com a seguinte expressão:

$$V \cdot T^n = cte$$

Equação 8



$$\text{HSS: } V \cdot T^{0.15} = 30$$

$$\text{Carbonetos: } V \cdot T^{0.25} = 150$$

$$\text{Cerâmicos: } V \cdot T^{0.45} = 500$$

Figura 12: Relação entre dureza e resistência mecânica de materiais típicos para ferramentas de corte [6]

Os valores apresentados acima são representativos e são amplamente utilizados para considerações económicas do processo de maquinagem.

Distinguem-se 4 grupos distintos de materiais para ferramentas caracterizados em seguida.

1) Carbonetos

Este tipo de material é bastante utilizado para ferramentas de corte, nomeadamente no corte de aços e suas ligas, podendo ser excecionalmente utilizado em corte de materiais não ferrosos [6]. São caracterizados por apresentarem uma excelente resistência ao desgaste e por possuírem uma elevada dureza, mesmo quando aquecidos [6]. É composto por partículas de carboneto (de tungsténio, titânio, etc) que são ligados por uma matriz de cobalto, através de um processo de sinterização.

Os carbonetos são vastamente empregues como substrato para todo o tipo de revestimentos, permitindo um endurecimento da superfície da ferramenta e aumentando a resistência ao desgaste. Ao mesmo tempo, os revestimentos proporcionam uma redução do atrito entre a apara e a face de ataque da ferramenta, atuando também como escudo térmico e aumentando a resistência à corrosão, o que melhora significativamente a vida útil da ferramenta.

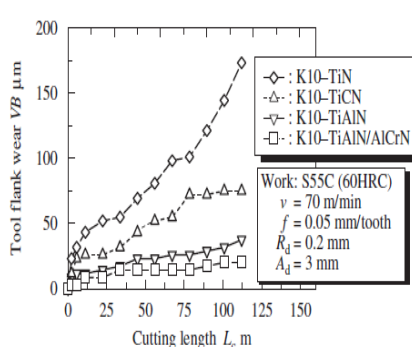
A tabela seguinte apresenta os vários revestimentos disponíveis no mercado e as suas principais características:

Tabela 2: Revestimentos e materiais por eles maquináveis

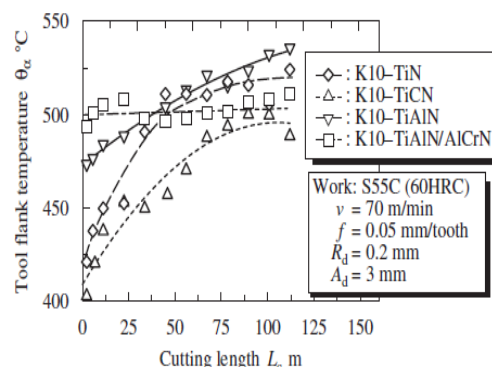
Revestimento	Características
Nitreto de titânio, TiN	Aços
Carboneto de titânio, TiN(C,N)	Ferros fundidos, aço ferramenta, cobre e suas

	ligas;
Nitreto de titânio alumínio, (Ti,Al)N	Ferros fundidos, alumínio e suas ligas e níquel e suas ligas; Elevada resistência à corrosão
Nitreto de crômio, CrN	Alumínios e suas ligas

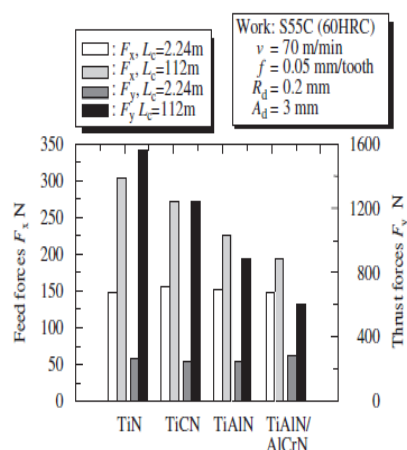
Um estudo realizado em [10] permite observar o seguinte comportamento dos vários revestimentos acima descritos para o desgaste linear na face de saída, V_b , A temperatura na face de ataque, θ_a , a rugosidade superficial, R_a , e as forças de corte, F_x, F_y .



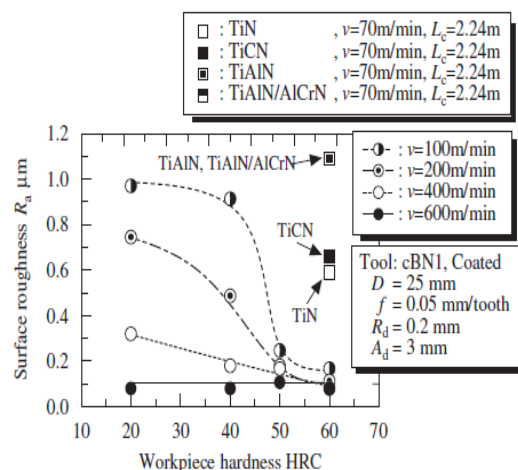
Desgaste linear na face de saída



Temperatura na face de ataque



Forças de corte



Rugosidade superficial

Figura 13: Variação dos vários parâmetros para os vários revestimentos [10]

Estes resultados permitem verificar que o revestimento de TiAlN apresenta o mais baixo desgaste linear na face de saída, assim como as menores forças de corte, apresentando uma temperatura na face de ataque elevada e uma rugosidade superficial também ela elevada. Este revestimento é especialmente importante dado que, como foi acima referido, é indicado para o corte de alumínio e suas ligas.

2) Cerâmicos

Este tipo de materiais consistem em finos grãos de óxido de alumínio sinterizado sob elevada pressão e temperatura. São caracterizados pela sua elevada dureza, mesmo a elevadas temperaturas, sendo especialmente vantajosos para o corte sem lubrificação.

Outra grande vantagem é a sua estabilidade química, uma vez que não reagem com o material que está a cortar. Os cerâmicos são adequados para o corte de materiais ferrosos, incluindo superligas, não sendo porém recomendado para o corte de ligas de cobre e de alumínio, devido à facilitação de formação de arestas postiças de corte.

A grande desvantagem dos cerâmicos centra-se no seu elevado custo e na sua elevada fragilidade. Assim, raramente são utilizados revestimentos nos materiais cerâmicos, quer devido ao custo associado, bem como pela fraca aderência entre o substrato (cerâmico) e o revestimento [6].

3) Nitreto de Boro (PCBN)

Este tipo de ferramenta é caracterizado por possuir elevada resistência ao impacto, sendo adequada para o corte de grandes profundidades e altas velocidades. O PCBN possui uma excelente capacidade de dissipação de calor, assim como uma elevada resistência mecânica. Neste prisma, são bastante indicados para o corte de materiais muito duros ou que tenham sido tratados termicamente, uma vez que promovem excelentes acabamentos superficiais aliada a uma elevada produtividade.

4) Diamante policristalino (PCD)

O diamante é o material mais resistente e duro que se conhece na natureza, tendo a maior condutibilidade térmica e o mais baixo atrito, tornando-o num material excelente para o fabrico de ferramentas de corte. As ferramentas fabricadas com este tipo de material têm uma elevada resistência à abrasão e condutibilidade térmica, levando a que a vida útil da ferramenta seja prolongada, e consequentemente promova uma elevada produtividade. Não obstante, este tipo de ferramenta apresenta uma baixa resistência mecânica [6].

Na figura seguinte apresentam-se alguns regimes recomendados para este tipo de ferramenta:

Work material	Cutting speed (m/min)	Cutting feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)
Aluminium alloys <12% Si	1000–3000	0.1–0.4	5
>12% Si	200–600	0.1–0.4	1
Metal matrix composites (MMC)	150–600	0.1–0.4	0.5
Brass	600–2000	0.1–0.4	1.5
Hard plastics	1000–7000	0.1–0.7	2.5
Carbon-fibre-reinforced plastics (CFRP)	500–2000	0.05–0.4	4
Sintered tungsten carbide 18% Co	40–60	0.05–0.2	0.5
Precious metals	100–500	0.05–0.4	1.5

Figura 14: Regimes de corte para ferramentas PCD [6]

A figura seguinte resume os materiais de ferramentas de corte e as suas aplicações para os diversos tipos de materiais:

	Soft non-ferrous (Al, Cu)	Carbon/low alloy steels	Hardened tool and die steels	Cast iron	Nickel-based alloys	Titanium alloys
High speed steel	O/⊗	O/⊗	x	⊗/x	⊗/x	⊗/x
Carbide (inc. coated)	O	√/O	⊗	√/O	√	O
Cermet	⊗/x	√	x	⊗	x	x
Ceramic	x	√/O	O	√	√/O	x
cBN	⊗/x	x	√	√/O	O	O
PCD	√	x	x	x	x	√

√ good; O all right in some conditions; ⊗ possible but not advisable; x to be avoided.

Figura 15: Tipos de materiais de ferramentas e suas adequabilidades para o corte de diversos materiais. [9]

A partir da figura 15 pode-se verificar que os materiais mais indicados para o corte de alumínio são o aço rápido, as ferramentas de carboneto de tungsténio (quando revestidas) e as ferramentas de PCD. Estas últimas são as mais indicadas, sendo no entanto, mais dispendiosas. Por este motivo, é mais vulgar a utilização de ferramentas de carboneto de tungsténio revestidas com TiAlN, uma vez que representam a melhor relação qualidade de corte/preço da ferramenta. As ferramentas de aço rápido acabam por ser a terceira escolha, não apresentando nenhuma vantagem em relação às ferramentas atrás mencionadas, com exceção do seu custo, dado que são as menos dispendiosas deste grupo de ferramentas.

Os materiais das ferramentas influenciam grandemente a vida das mesmas. Por sua, a vida da ferramenta define a produtividade do processo de corte, pelo que sempre que possível deverão ser escolhidos parâmetros e revestimentos de modo a maximizar a vida útil da ferramenta. Esta última encontra-se diretamente ligada ao desgaste da ferramenta, sendo que a principal medida de desgaste é o desgaste linear na face de saída, que origina um aumento nas forças de corte, das vibrações e da temperatura. Estes eventos levam, consequentemente a uma diminuição da qualidade superficial da peça produzida [11]. Prever o desgaste das ferramentas torna-se, portanto, deveras importante.

Em [12] estudou-se o desempenho de ferramentas com e sem revestimento em que, no caso das ferramentas revestidas tratava-se de TiAlN, sendo que o material maquinado foi uma liga de alumínio aeroespacial 7010-T7651. Os autores definiram um critério de desgaste linear, V_b de 0.23 mm e maquinaram a liga de alumínio até se atingir esse mesmo valor de desgaste linear. Os resultados obtidos foram sintetizados no seguinte gráfico:

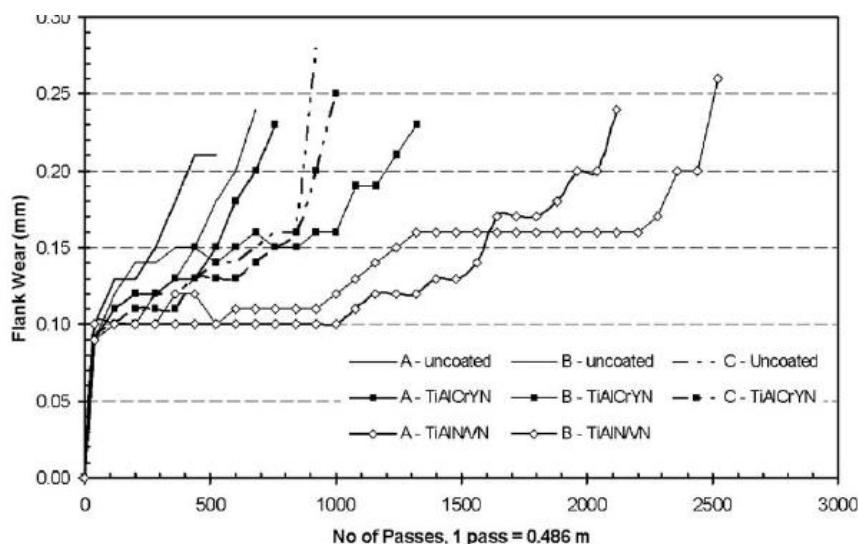


Figura 16: Desgaste linear verificado para ferramentas revestidas e não revestidas [12]

Deste gráfico verifica-se que a utilização de um revestimento de TiAlN permite aumentar substancialmente a vida da ferramenta. A título de exemplo, uma ferramenta não revestida corta, nas condições do estudo, 340 m de material até atingir o critério de desgaste linear, enquanto que uma ferramenta revestida corta 1215 metros de material. Trata-se de um aumento de 357% na vida da ferramenta.

Segundo [12], também a rugosidade superficial e as forças de corte vêm reduzidas aquando da utilização de revestimentos. Tal deve-se ao facto destes conferirem uma maior dureza da ferramenta, permitindo que esta permaneça afiada durante mais tempo. Simultaneamente, o coeficiente de atrito é mais reduzido, levando a um menor desgaste das ferramentas, ao mesmo tempo que permite uma redução das forças do processo.

De modo a prever a vida da ferramenta com base nos vários parâmetros de corte possíveis em fresagem, recorre-se muitas vezes à lei de Taylor generalizada:

$$V_c \cdot T^n \cdot a^m \cdot P^q = cte \quad \text{Equação 9}$$

Para a obtenção dos expoentes desta lei empírica são necessários testes à vida da ferramenta que tenham em atenção todos estes parâmetros. No estudo realizado em [13], em que os autores pretendiam determinar por métodos numéricos a vida da ferramenta, estes necessitaram de realizar testes reais de vida de ferramenta para terem um ponto de comparação ao seu estudo. A liga maquinada em [3] era uma liga Al 7075 e os resultados obtidos estão sintetizados na seguinte figura:

No	Spindle speed (rpm)	Feed rate (mm/min)	Depth of cut (mm)	Tool life measured during process (min)	Tool life predicted by ANN (min)	Error %
1	95	132	0.6	23	26.43797	-0.14948
2	360	22	0.4	554	582.8904	-0.05215
3	565	360	0.4	276	276.3392	-0.00123
4	950	200	0.4	367	371.4312	-0.01207
5	1500	98	0.2	163	165.5439	-0.01561

Figura 17: Resultados obtidos para a vida da ferramenta [13]

De notar que a ferramenta utilizada neste estudo foi uma fresa de 20 mm em aço rápido (HSS).

Utilizando os resultados acima para obter a lei de Taylor generalizada, obteve-se a seguinte expressão:

$$V_c \cdot T^{16.32} \cdot a^{4.68} \cdot P^{-26.48} = 9.74e50 \quad \text{Equação 10}$$

Esta expressão é válida para ferramentas em aço rápido. O estudo [2] permitiu concluir que a vida de ferramenta vem aumentada em 357 % quando são utilizados revestimentos de TiAlN. Deste modo, bastará multiplicar a equação acima por um fator de 3.57 para se obter uma expressão para a vida de ferramentas revestidas a TiAlN.

Assumindo um coeficiente de segurança, a expressão da vida de ferramentas revestidas de TiAlN vem dada por:

$$T(\text{TiAlN})=3.T(\text{HSS}) \quad \text{Equação 11}$$

A utilização desta expressão permite determinar, com algum erro¹, a vida da ferramenta. Não obstante a este facto, a mesma permite ter uma noção do tempo de vida da ferramenta, possibilitando compreender se esta consegue executar todas as operações de maquinagem que lhes são impostas.

1.3 Trajetórias de maquinagem

A definição das trajetórias de maquinagem é de extrema importância no processo de maquinagem. Uma trajetória de maquinagem define-se como o caminho no espaço que a ferramenta percorre para que se obtenha a superfície pretendida. Estas trajetórias podem ser lineares, caso a ferramenta descreva trajetórias retas, ou circulares, quando a ferramenta descreve trajetórias curvilíneas. Neste último tipo, os controladores numéricos

¹ Dado que a expressão obtida só é válida para a gama de valores do estudo [13], o que leva a erros de extrapolação quando usada fora do intervalo dado.

deverão ser capazes de realizar interpolações lineares de modo a que a ferramenta consiga descrever a trajetória pretendida. A escolha das trajetórias tem influência tanto no tempo de maquinagem como na qualidade das peças obtidas pelo que, para cada operação, deverá ser estudada a melhor estratégia. Em [14], os autores propõem testar estratégias de maquinagem. De acordo com os mesmos, o processo de maquinagem pode ser otimizado alterando o tipo de ferramenta utilizada e o tipo de trajetória, dividindo o bruto de maquinagem em camadas de corte, etc, de modo a reduzir o tempo de processamento, obtendo simultaneamente a precisão imposta.

Definida a ferramenta, os autores procederam a várias operações de maquinagem, tais como facejamento, furação e abertura de caixa. As estratégias de maquinagem implementadas em [14] foram feitas com base na trajetória da ferramenta, na qualidade superficial e na duração do processo.

O que se verificou em [14] foi que, mediante os critérios seleccionados, os tempos de processamento alteravam-se drasticamente. Deste modo, os autores em propuseram duas soluções mediante as variadas trajetórias de maquinagem:

1. Menor tempo total (inclui tempo de maquinagem e tempos não produtivos): indicado para maximizar a produtividade em pequenos lotes de fabrico;
2. Maiores tempos de maquinagem: indicado para a obtenção de menores rugosidades superficiais já que, segundo os autores, um maior tempo de maquinagem implica um maior contacto entre a ferramenta e o material (implicando, pois, um maior desgaste da ferramenta).

Pode-se portanto concluir que a escolha das trajetórias de maquinagem a seguir encontra-se intimamente ligada a critérios de dimensão dos lotes de produção, à qualidade superficial imposta no projeto e, inclusive, critérios económicos.

1.4 Preparação de trabalho

Outro fator não menos importante no processo de maquinagem é a preparação de trabalho. A preparação de trabalho consiste na ligação entre a engenharia de projeto e a produção e diz respeito à seleção dos processo e ferramentas adequadas para transformar a matéria prima. A preparação de trabalho pode então ser definida como um procedimento para a determinação dos métodos e da sequencia de fabrico para a produção de um componente com as especificações exigidas pelo projeto. Uma boa preparação de trabalho permite uma otimização geral do processo, reduzindo custos e flexibilizando a produção.

Uma boa preparação de trabalho deverá incluir a seleção dos brutos de maquinagem, a seleção dos dispositivos e ferramentas, bem como das máquinas

ferramenta. Deverá também incluir a seleção das condições do processo (parâmetros) e a sequência de operações.

O estudo realizado em [18] teve como objetivo a redução dos tempos de ciclo de produção, em particular, em casos de peças estruturais aeronáuticas. Tal deve-se ao facto de, neste sector em particular, a dimensão dos lotes produzidos são de tal forma reduzidos, que uma redução de tempo irá promover, igualmente uma redução no custo unitário de cada peça produzida.

Assim sendo, define-se a seguinte organização para os procedimentos de preparação de trabalho:

1. Dimensões do bruto de maquinagem: As dimensões deverão ser tais que deverão permitir obter a peça pretendida, e sempre que possível, com dimensões inferiores às da área de trabalho das máquinas disponíveis (para evitar subcontratação). No caso de peças pequenas, deverá ser equacionado a maquinagem de várias unidades no mesmo bruto de maquinagem;

2. Ferramentas potenciais: Estas deverão ser escolhidas com base no material a cortar, no comprimento de corte (que dependerá da altura das paredes da peça a obter), no diâmetro da fresa (que irá depender da largura entre paredes da peça a obter) e no raio de canto, quando aplicável, que será determinado pelo menor raio de concordância existente na peça a obter.

3. Identificação de potenciais complicações: Como é o caso da maquinagem de paredes finas, sujeitas a deformações. Nestes casos, a fresagem periférica será preferível, uma vez que cria menores esforços na parede a maquinar, e o corte periférico permite obter melhor acabamento, reduzindo tempo (dado não haver necessidade de operações subsequentes de acabamento).

4. Fixação do bruto de maquinagem à máquina: A fixação é feita, tipicamente, recorrendo a excesso de material em forma de abas que, após a maquinagem da peça, são removidas por corte manual. Outro aspeto importante é a orientação da peça no bruto de maquinagem. Esta seleção deverá ter em conta que a peça deverá ser orientada de modo a que a maioria dos planos possam ser maquinados através de “fresagem de topo”. Assim sendo, a orientação da peça deverá ser escolhida com base no plano que possui a maior área passível de ser maquinada por “fresagem de topo”. Dentro dos dispositivos de fixação, podem distinguir-se dois, definidos como *standard*: as prensas mecânicas e os grampos.

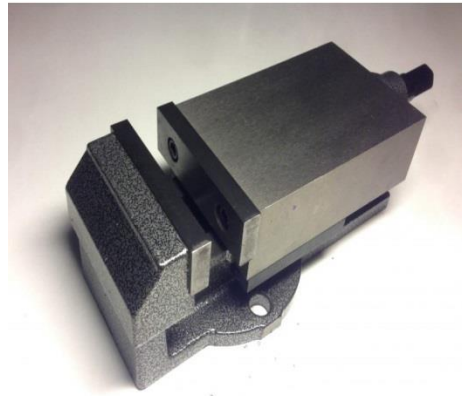


Figura 18: Grampos e prensa mecânica

Para operações de fresagem a 3 eixos, estes dois dispositivos de fixação permitem obter praticamente todas as geometrias. A sua desvantagem prende-se com o facto de não serem “personalizáveis” para cada componente produzido. No caso de certas geometrias, como quando é o caso de geometrias sujeitas a empenos após a maquinagem, estes dispositivos são desaconselháveis.

Uma maneira de acelerar o processo de planeamento de trabalho será o de se recorrer às designadas tecnologias de grupo. Estas consistem em agrupar diversos grupos de geometrias através da sua similaridade física, sendo que, geometrias semelhantes recorrerão a processos e parâmetros semelhantes. No caso das peças aeronáuticas, pode-se distinguir dois grupos distintos de peças que, deverão ser agrupadas: peças cujo comprimento é elevado e cuja espessura é reduzida e peças de dimensões reduzidas com insensibilidade à dimensão da espessura. Para as primeiras deverá ser acautelado o fenómeno de empeno, pelo que as estratégias e parâmetros utilizados deverão ser semelhantes. As segundas não aparentam grandes problemas para a sua obtenção. A utilização da filosofia das tecnologias de grupos permite assim agrupar estratégias e procedimentos para cada tipo de geometria, permitindo poupar tempo e dinheiro. Para se proceder à decisão dos parâmetros de corte e dos dispositivos de fixação, baseados nas tecnologias de grupo, pode recorrer-se ao seguinte diagrama de decisão:

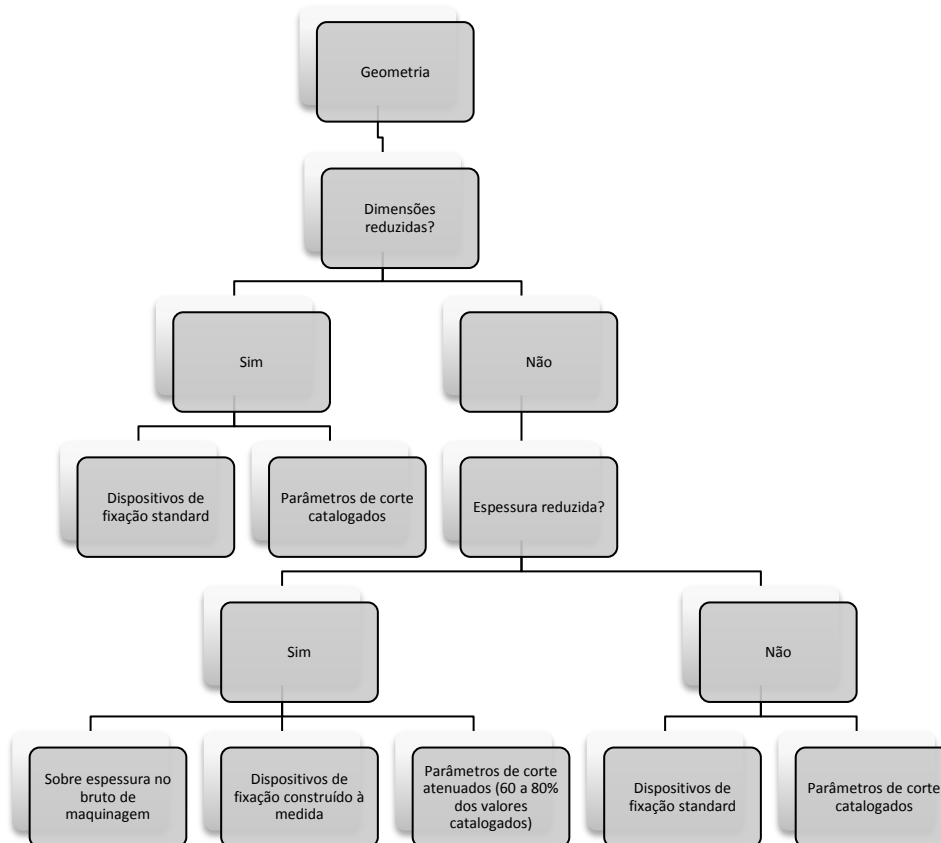


Figura 19: Diagrama de decisão baseado nas tecnologias de grupo

Incluída na preparação de trabalho está também a fixação das ferramentas à máquina ferramenta. A escolha dos dispositivos de fixação é feita tendo em conta a rigidez, em termos de binário e flexão, e ainda o batimento radial. [16]

Os fabricantes oferecem, tipicamente, três tipos distintos de fixação [17]: a fixação mecânica, caracterizada por apresentar forças de retenção elevadas o que permite velocidades de rotação até às 12000 RPM, representando um custo intermédio de aquisição, apresentando, contudo, como grande desvantagem o perigo de desaperto da ferramenta que poderá levar a maus acabamentos superficiais e, em casos extremos, quebra da ferramenta e/ou da peça a maquinar. Outro tipo de fixação é a designada fixação hidráulica que ajuda a amortecer vibrações e que permite velocidades de rotação superiores (até 25000 RPM). Este tipo de fixação é a que representa o custo mais elevado das três soluções apresentadas. Por último, existe ainda a fixação térmica, considerada o método mais simples e barato de fixação de ferramentas, apresentando também um reduzido batimento radial, permitindo bons acabamentos superficiais e precisão dimensional. É de todos o dispositivo mais barato, sendo visto como pouco vantajoso apenas quando se verifica a necessidade de equipamentos adicionais para a montagem/desmontagem das ferramentas.

Assim sendo, a escolha dos dispositivos de fixação deverá ter em conta não só a operação a realizar, mas também o custo associado aos dispositivos de fixação em si.

A seguinte figura mostra os vários tipos de fixação disponíveis no mercado:



Fixação mecânica



Fixação hidráulica



Fixação térmica

Figura 20: Tipos de fixação de fresas [16]

2. Programação CAD/CAM

A programação CAD/CAM consiste na importação de um modelo CAD do componente a produzir para um *software* de CAM e neste, proceder à programação de todas as trajetórias de maquinagem de modo a obter o componente pretendido. A designação CAM vem do inglês *computer aided manufacturing* (programação assistida por computador) e refere-se à geração semiautomática de trajetórias de maquinagem através do controlo numérico, baseando-se num modelo de CAD desenvolvido anteriormente [5].

De um modo geral, a programação poderá ser feita de duas maneiras distintas: uma, em que as trajetórias são programadas manualmente, com recurso a um editor de texto, e outra em que se recorre a *softwares* de CAM para gerar as trajetórias de maquinagem.

O código gerado é enviado para uma máquina, que vulgarmente se designa por CNC. Uma máquina CNC é um equipamento que opera por comando numérico, isto é, opera automaticamente, por meio de motores, após terem sido programadas as trajetórias a executar.

Existem dois tipos de códigos distintos que as máquinas ferramenta conseguem ler: o código G, que contém instruções acerca dos movimentos da ferramenta e o código M que contém instruções para todos os movimentos da máquina que não incluam o movimento da ferramenta (por exemplo, abertura e fecho de portas). Após a geração das trajetórias de maquinagem, o *software* de CAM deverá ser capaz de escrever todas as instruções nos códigos acima indicados, de modo a que se obtenha o componente pretendido.

De um modo geral, o procedimento para a programação em CAM encontra-se sintetizado na seguinte figura:

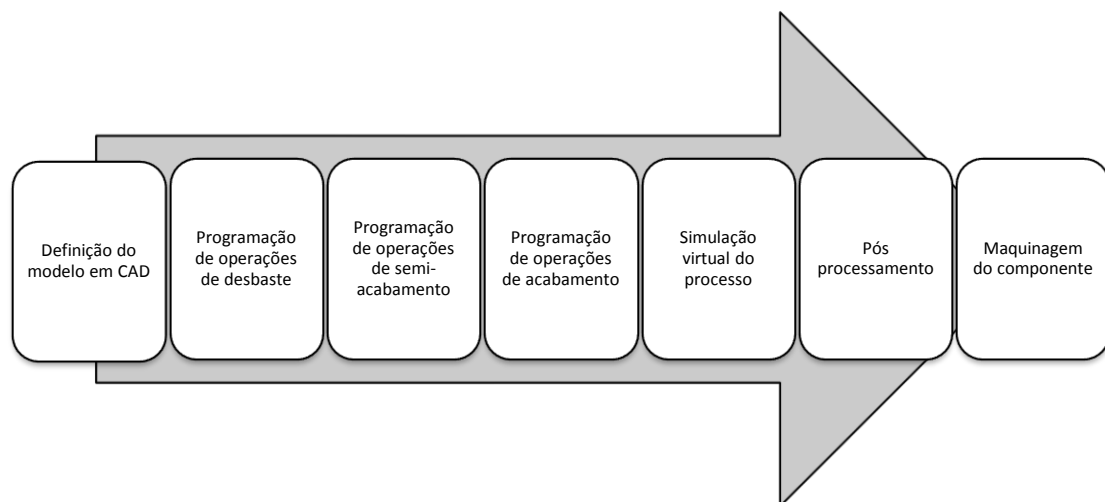


Figura 21: Esquema de funcionamento do procedimento de programação CAM [6]

Um caso particular de *software* CAD/CAM que foi utilizado para a realização deste trabalho é o *CATIA V5*. Este é um *software* CAD/CAM/CAE comercial, desenvolvido pela

Dassault Systemes em 1977, tendo sido adotado em várias indústrias, com especial impacto na indústria aeronáutica, automóvel e naval [8]. O *CATIA* é utilizado em vários estágios do desenvolvimento do produto, desde a conceção e *design* (módulo CAD), produção de componentes (módulo CAM) até à engenharia e otimização (módulo CAE) [8]. É, ainda, especialmente útil para o desenho de superfícies e engenharia reversa. Outra das suas vantagens incide no facto de permitir o completo desenvolvimento do produto sem nunca ter de abandonar o *software*. Para além deste *software*, existem no mercado várias alternativas, como é o caso do *Solidworks*, que já incorpora um módulo de CAM. Dedicados apenas ao CAD existe o *Autodesk inventor*. Para este último, e como se torna necessário mudar de *software* para fazer o CAM, há que alterar a extensão do ficheiro, para que possa ser lido por um *software* de CAM, como por exemplo, o *MasterCam*.

No que diz respeito ao módulo de produção de componentes maquinados, o *software* funciona de acordo com o seguinte esquema:

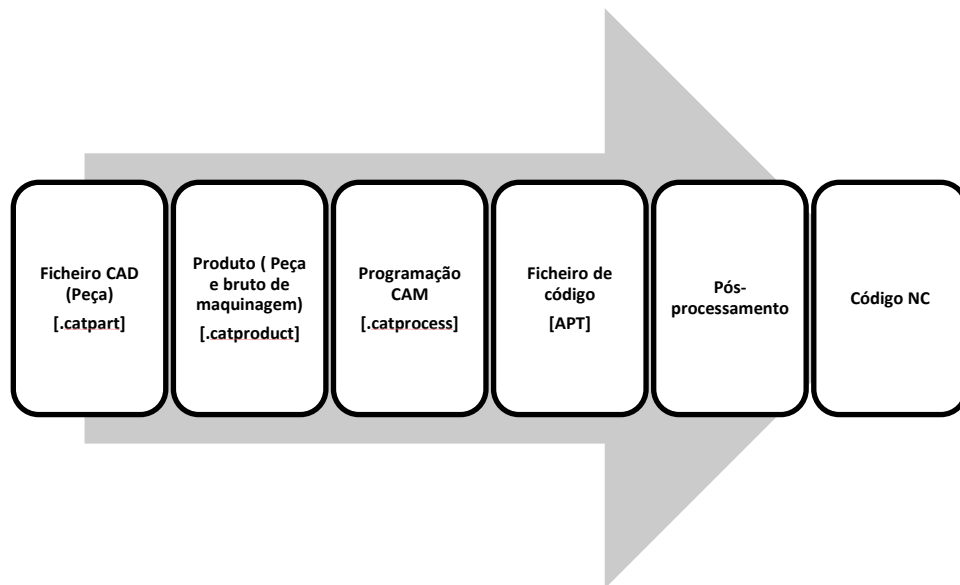


Figura 22: Esquema de funcionamento do CATIA desde a concepção ao fabrico de um componente

O *CATIA V5* permite gerar dois tipos de ficheiros: um ficheiro designado APT ou, em alternativa, um ficheiro de código NC. O primeiro servirá para exportar para *softwares* de teste e otimização, como é o caso do *VERICUT* ou *ICAM*. O segundo pode ser enviado diretamente para a máquina ferramenta para ser executado.

<pre> TOOLNO/1,MILL,1,0, 12.000000, 83.000000,\$ 83.000000, 83.000000,, 60.000000,, 16.000000,\$ 11520.000000,MMPM, 8000.000000,RPM,CLW,\$ ON,,NOTE TPRINT/T1 VHM 3D,T1 VHM 3D,T1 VHM 3D LOADTL/1,1,1 \$\$ TOOLCHANGEEND \$\$ End of generation of : Tool Change.1 \$\$ OPERATION NAME : Roughing.1 \$\$ Start generation of : Roughing.1 LOADTL/1,1 FEDRAT/ 300.0000,MMPM SPINDL/ 8000.0000,RPM,CLW GOTO / -359.01000, 102.49996, 5.00000 GOTO / -359.01000, 102.49996, -5.00000 GOTO / -350.00000, 102.49996, -5.00000 </pre>	<pre> N1 G54 G64 G40 G90 G17 G94 G49 G80 N2 G53 N3 T1 M6 N4 G0 X-359.01 Y102.5 S8000 M3 N5 Z5. N6 G1 Z-5. F300. N7 X-350. N8 Y200. F11520. N9 X0 N10 Y0 N11 X-350. N12 Y102.5 N13 X-342.2 N14 Y192.2 N15 X-343.356 Y193.356 N16 X-342.2 Y192.2 N17 X-7.8 N18 X-6.644 Y193.356 N19 X-7.8 Y192.2 N20 Y7.8 N21 X-6.644 Y6.644 </pre>
---	---

Figura 23: Exemplo de código APT e código NC gerado

O ficheiro de código APT fornece as trajetórias da ferramenta de uma forma simples, do tipo GOTO X, Y, Z, assim como informação acerca da ferramenta (TOOLNO), velocidades de avanço (FEDRAT) e velocidade de rotação da árvore da máquina (SPINDL).

O ficheiro NC contém as informações referentes à trajetória das ferramentas e parâmetros de corte numa linguagem que a máquina ferramenta consegue ler e executar. Após o pós-processamento, o código NC é gerado (vulgarmente designado código G), sendo possível agora o fabrico dos componentes.

Sumariamente, pode estabelecer-se como método de trabalho o método explícito no seguinte esquema:

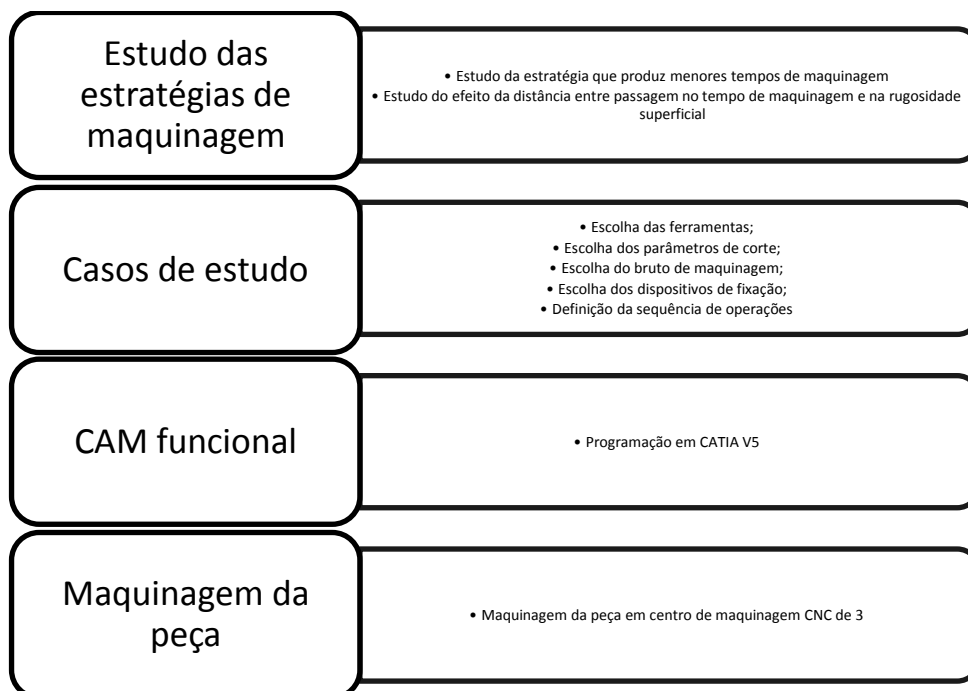


Figura 24: Esquema conceptual de procedimento a seguir para a obtenção de peças aeronáuticas

No que diz respeito às trajetórias de maquinagem é importante conseguir descrever o processo de obtenção de uma peça em pequenas operações, cujo somatório irá resultar na obtenção do componente pretendido. O *software* de CAM permite distinguir operações de desbaste, facejamento, abertura de caixa, contorneamento, etc para as quais apresenta diferentes trajetórias para realizar a mesma operação. A otimização dessas trajetórias é essencial para se maximizar a produtividade.

O *software* CATIA V5 possui variadas operações elementares para a obtenção da geometria final. Em seguida será feita uma análise a essas operações e, para cada uma delas, será selecionada a melhor trajetória de maquinagem, que terá como principal critério de escolha o menor tempo de maquinagem obtido.

2.1 Abertura de caixa

As operações de abertura de caixa são muito frequentes em fresagem. Deste modo, por forma a otimizar-se o processo idealizou-se a seguinte geometria:

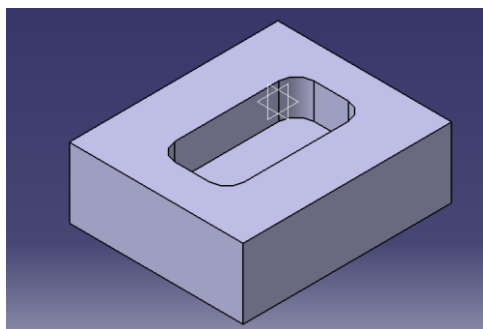


Figura 25: Geometria idealizada para otimização do processo de abertura de caixa

Para a realização do estudo foi necessário conceber uma ferramenta e atribuir-lhe parâmetros de corte, que por sua vez não apresentam significado físico e apenas serviram como *input* (dados de entrada) no *software* de CAM, de modo a poder estudar-se as diversas trajetórias apresentadas.

Tabela 3: Características da ferramenta utilizada

Diâmetro	3 mm
Comprimento	57 mm
Comprimento de corte	6 mm
Nº de arestas de corte	4
Raio de bico	0.1 mm

Os parâmetros inseridos no *software* foram os seguintes:

Tabela 4: Parâmetros utilizados

Velocidade de rotação, n	4000 RPM
Velocidade de avanço (desbaste)	560 mm/min
Velocidade de avanço (acabamento)	320 mm/min

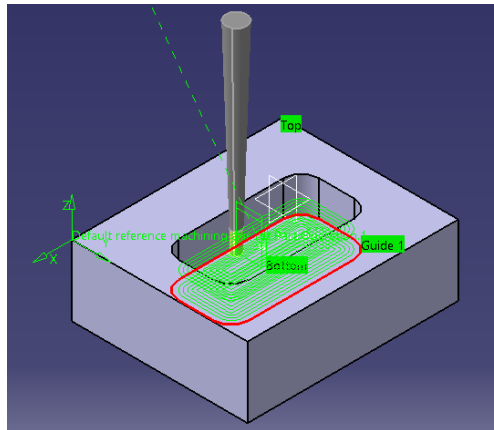


Figura 26: Simulação do processo de abertura de caixa

Definidos os parâmetros descritos, procedeu-se à simulação das várias trajetórias de maquinagem permitidas pelo *CATIA V5*. Os gráficos seguintes enumeram as referidas trajetórias, bem como os resultados obtidos em termos da sua duração e rugosidade superficial teórica:

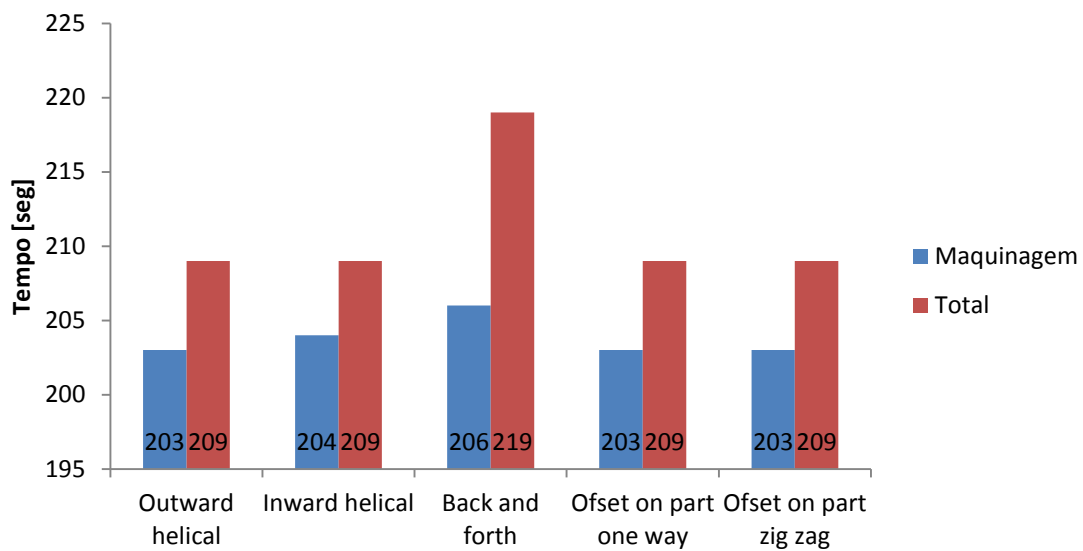


Figura 27: Tempos obtidos para as várias trajetórias

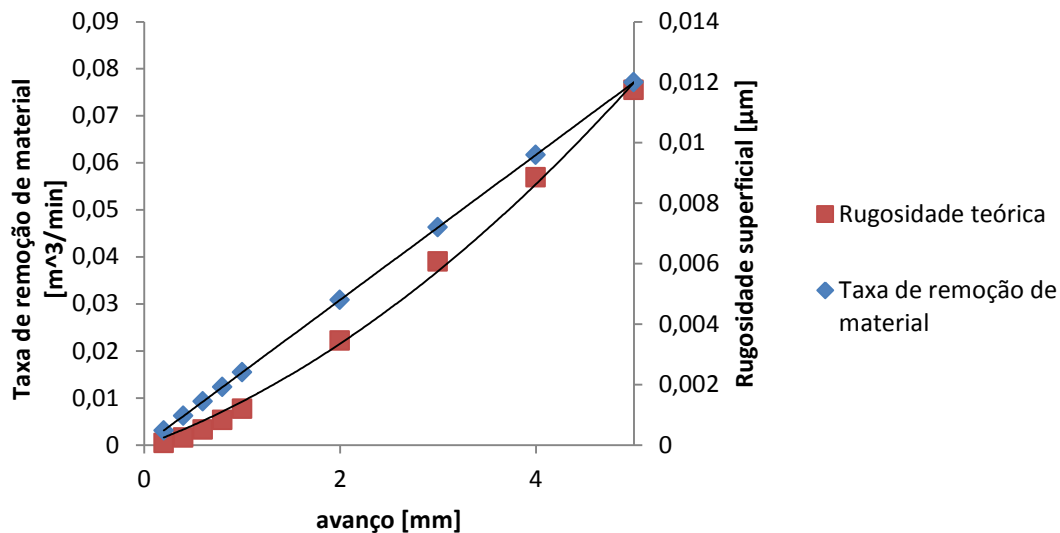


Figura 28: Variação da taxa de remoção de material e da rugosidade teórica em função do avanço (*outward helical*)

A figura 27 permite verificar que existem 5 trajetórias disponíveis. As operações “*outward helical*” e “*inward helical*” são trajetórias circulares enquanto que as restantes são trajetórias lineares em *zig zag*. Dependendo da trajetória escolhida, o tempo de maquinagem e o tempo total modificam-se. Numa perspetiva de redução dos tempos verifica-se que a estratégia “*Outward Helical*” é a mais eficaz.

Quanto à rugosidade, pela figura 28 verifica-se que aumentando o valor do avanço, as taxas de remoção de material aumentam (diminuindo consequentemente os tempos de maquinagem). Essa diminuição dos tempos de maquinagem é conseguida à custa de uma pior rugosidade superficial. Assim sendo, faz apenas sentido diminuir o avanço para operações de acabamento, sendo que o avanço utilizado em operações de desbaste deverá ser o maior possível.

2.2 Facejamento

Em fresagem as operações de facejamento são das mais frequentes, a par das operações de abertura de caixa. Deste modo, o objetivo deste subcapítulo é estudar a otimização deste processo com vista à redução do seu tempo de realização.

A geometria idealizada para otimizar o processo foi a seguinte:

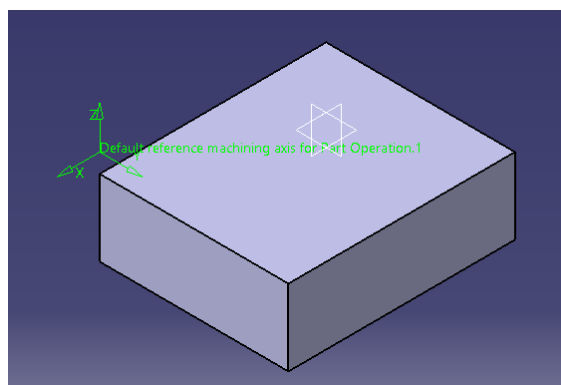


Figura 29: Geometria de teste para a operação de facejamento

Para realizar o estudo foi necessário conceber uma ferramenta e atribuir-lhe parâmetros de corte que não têm significado físico e apenas serviram como *input* (dados de entrada) no software de CAM, de modo a poder estudar-se as diversas estratégias apresentadas.

Tabela 5: Características da ferramenta

Diâmetro	10 mm
Comprimento	72 mm
Comprimento de corte	20 mm
Nº de dentes	4
Raio de bico	0.2mm

Tabela 6: Parâmetros de corte utilizados

Velocidade de rotação, n	4000 RPM
Velocidade de avanço (desbaste)	1440 mm/min
Velocidade de avanço (acabamento)	960 mm/min

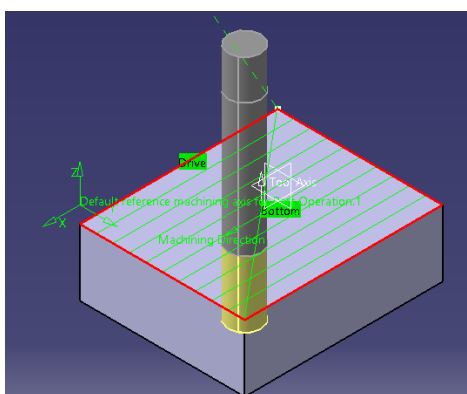


Figura 30: Simulação do processo de facejamento

Tal como na operação de facejamento, foram simuladas várias trajetórias de modo a obter-se os tempos do processo. Os resultados obtidos em termos de tempos e rugosidades foram os seguintes:

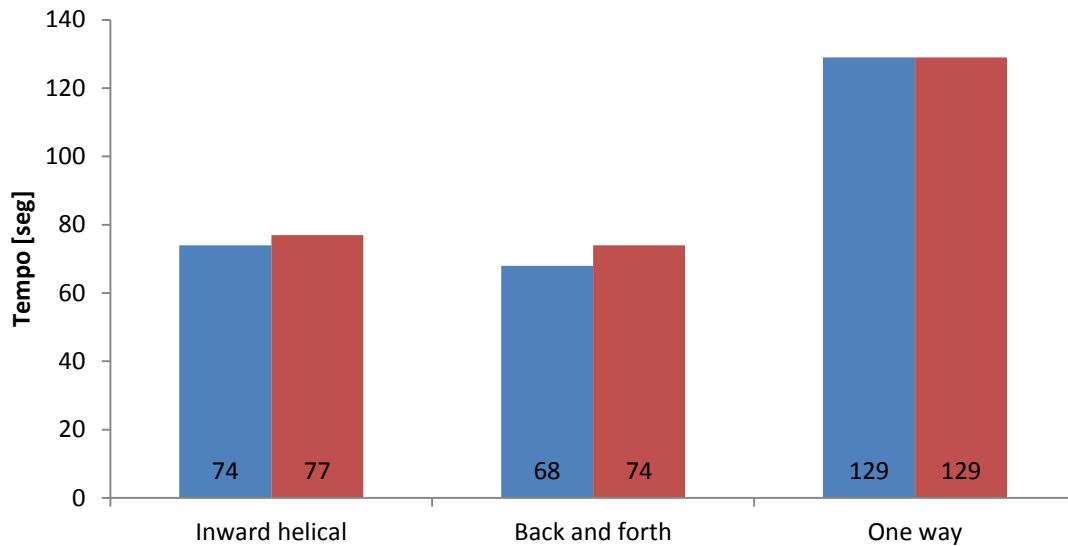


Figura 31: Tempos obtidos para as diferentes trajetórias testadas

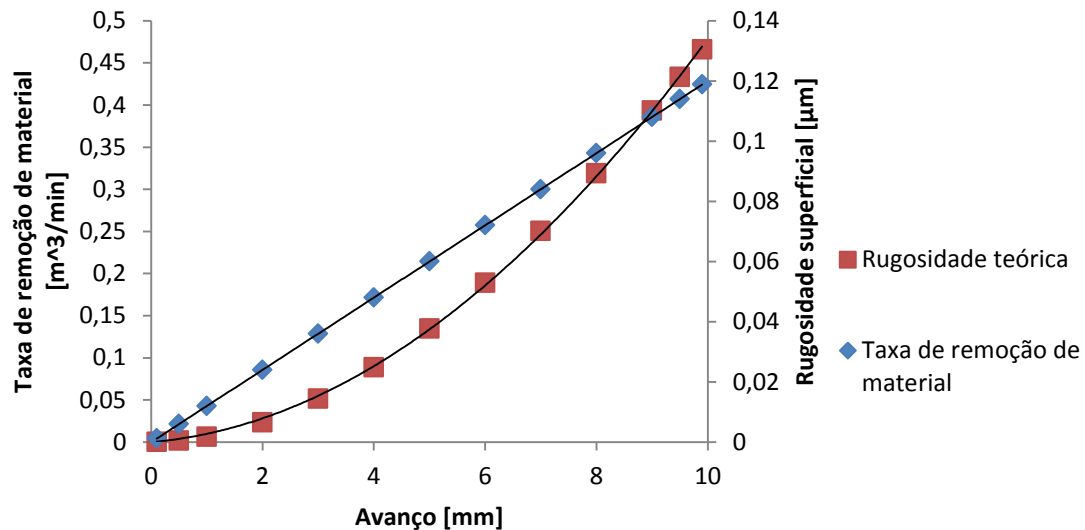


Figura 32: Variação da taxa de remoção de material e da rugosidade teórica em função do avanço

A partir da figura 31, verifica-se que a trajetória que melhores tempos obtém é a “back and forth”. Tal como na operação de abertura de caixa, existem trajetórias circulares (“inward helical”) e lineares (as restantes).

Já a figura 32 permite visualizar a influência da alteração deste parâmetro quer no tempo de maquinagem (patente no gráfico através da taxa de remoção de material), quer na rugosidade teórica:

Tal como na abertura de caixa, uma diminuição do avanço entre passagens permite reduzir substancialmente a rugosidade teórica da peça. No entanto, essa redução é feita à custa de um aumento exponencial do tempo de maquinagem (quanto maior for a taxa de remoção, menos será o tempo de maquinagem). Assim, para operações de desbaste devem ser utilizados avanços elevados de modo a diminuir o tempo de realização desta operação.

Já em operações de acabamento, esse avanço deverá ser reduzido para que se obtenha a melhor qualidade superficial possível.

2.3 Desbaste (*Roughing*)

O CATIA V5 permite ao utilizador proceder, numa única operação, ao desbaste de toda a peça. Deste modo, é lógico estudar quais as trajetórias de maquinagem mais rápidas para proceder a este tipo de operação.

Com o objetivo de testar a operação de desbaste, idealizou-se a seguinte geometria:

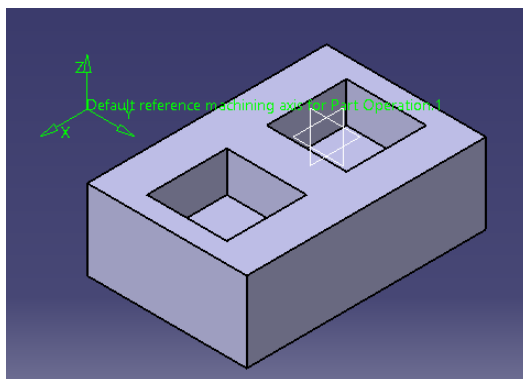


Figura 33: Geometria de teste

Para realizar o estudo, foi necessário conceber uma ferramenta e atribuir-lhe parâmetros de corte. Esses parâmetros não têm significado físico e apenas serviram como *input* (dados de entrada) no software de CAM, de modo a poder estudar-se as diversas trajetórias apresentadas.

Tabela 7: Características da ferramenta

Diâmetro	8 mm
Comprimento	63 mm
Comprimento de corte	21 mm
Nº de dentes	3
Raio de bico	0.4 mm

No que diz respeito aos parâmetros de corte utilizados, estes encontram-se sintetizados na tabela seguinte:

Tabela 8: Parâmetros utilizados

Velocidade de rotação, n	4000 RPM
Velocidade de avanço (desbaste)	960 mm/min

O CATIA V5 oferece ao utilizador variadas trajetórias de maquinagem para este tipo de operação. Os resultados obtidos encontram-se sintetizados no seguinte gráfico:

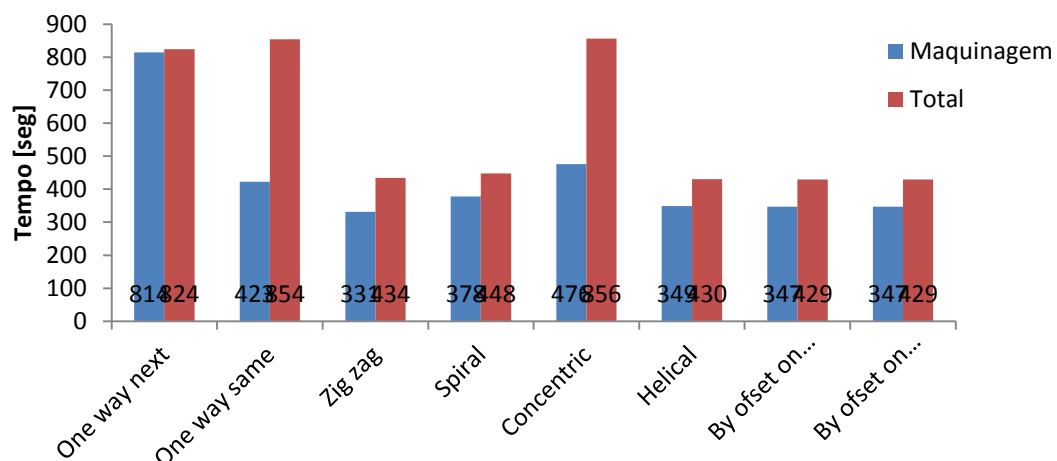


Figura 34: Tempos obtidos para as várias trajetórias

A figura 34 permite verificar que existem várias trajetórias circulares (“*Spiral*”, “*helical*”), sendo as restantes lineares. Também permite verificar que a trajetória “*Zig zag*” é a mais expedita. Tratando-se de uma operação de desbaste, não faz sentido estudar a influência da distância entre passagens. Deste modo, o avanço deverá ser o maior possível de modo a reduzir os tempos de maquinagem.

2.4 Sweeping

A operação de *sweeping* (varrimento) permite que a ferramenta faça um varrimento à peça de modo a que se obtenha a geometria final. Fisicamente é uma operação que se assemelha ao desbaste permitindo, no entanto, realizar acabamento na peça. Em certos casos é possível maquinar toda a peça usando esta operação.

Para o estudo das estratégias de maquinagem utilizou-se a geometria utilizada na operação de desbaste, trocando apenas a ferramenta.

Tabela 9: características da ferramenta

Diâmetro	5 mm
Comprimento	57 mm
Comprimento de corte	10 mm
Nº de dentes	4
Raio de bico	0.1 mm

Os parâmetros de corte utilizados estão sintetizados na seguinte tabela:

Tabela 10: Parâmetros utilizados

Velocidade de rotação, n	4000 RPM
Velocidade de avanço	800 mm/min

Os resultados obtidos para as estratégias de maquinagem e rugosidades foram os seguintes:

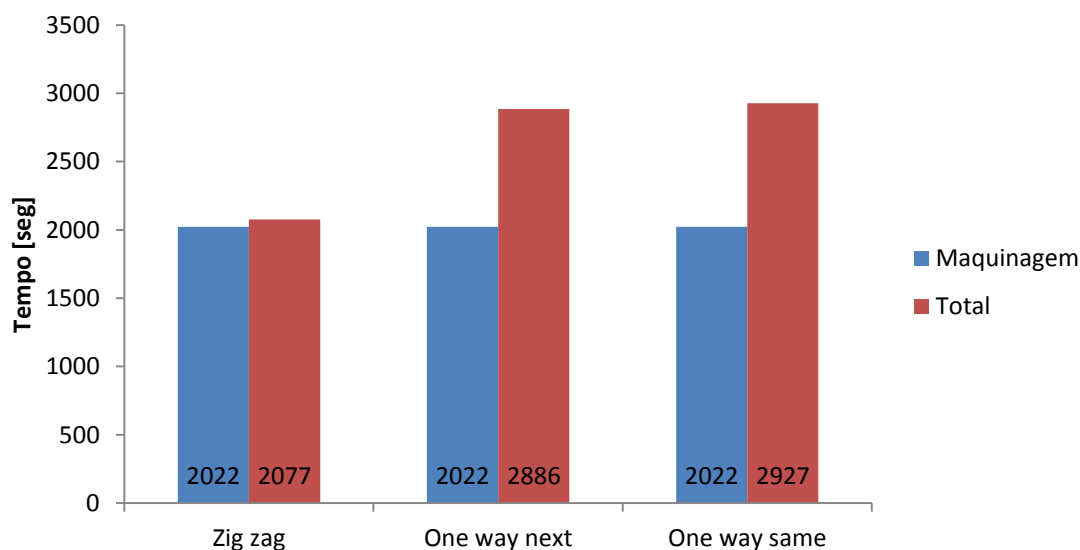


Figura 35: Tempos obtidos para as várias trajetórias

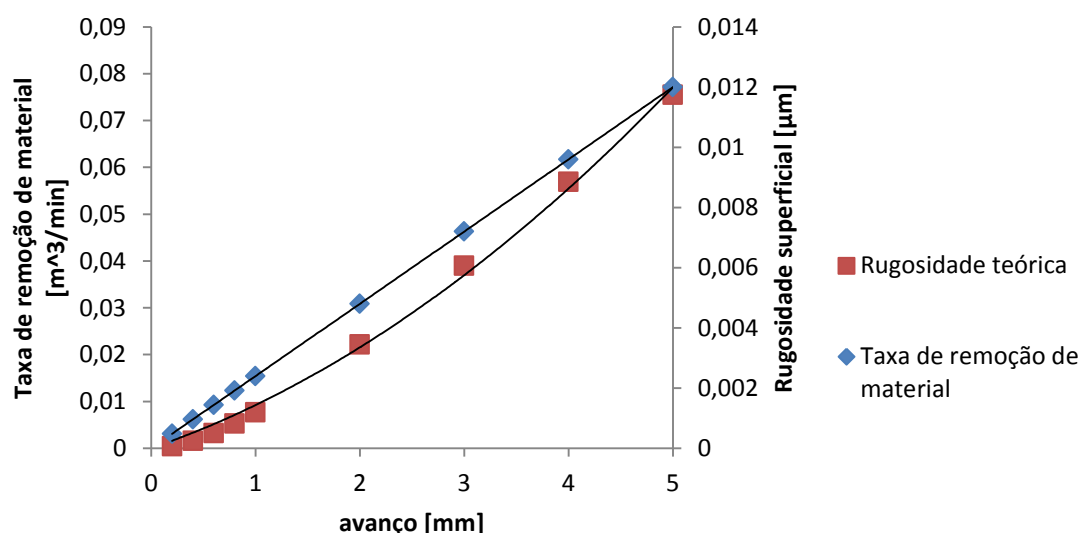


Figura 36: Variação da taxa de remoção de material e da rugosidade teórica com o avanço

Destas figuras verifica-se que o tempo de maquinagem não se altera independentemente da trajetória que se esteja a usar. No entanto, nos tempos totais já se verifica uma diferença, mostrando que as duas últimas trajetórias possuem tempos não produtivos muito acentuados. Também se verifica que, para esta operação, só estão disponíveis trajetórias lineares. Pode-se concluir também que neste tipo de operação a melhor estratégia a usar é a “zig zag”.

Tal como nos casos anteriores, um aumento do avanço entre passagens promove maiores taxas de remoção de material e, por conseguinte, um menor tempo de

maquinagem. Porém, para operações de acabamento será indicado a utilização de avanços entre passagens mais reduzidos, diminuindo assim a rugosidade superficial.

2.5 Isoparametric machining (contorneamento)

Esta operação é utilizada quando se pretende maquinar raios de concordância ou boleados, permitindo que a ferramenta siga o contorno da peça. Tipicamente, para este tipo de operações é recomendado o uso de fresas de ponta esférica ou fresas de topo com raio na extremidade.

De forma a testar quais as melhores trajetórias para esta operação, idealizou-se a seguinte geometria:

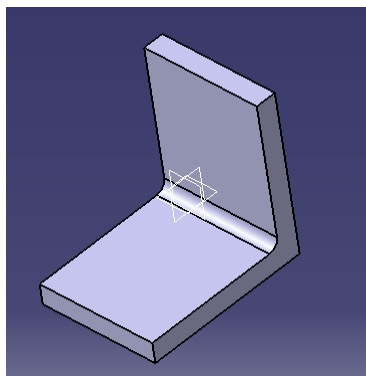


Figura 37: Geometria de teste para a operação

Para realizar o estudo foi necessário conceber uma ferramenta e atribuir-lhe parâmetros de corte que tal como nas operações anteriores não têm significado físico e apenas serviram como *input* (dados de entrada) no software de CAM, de modo a poder estudar-se as diversas estratégias apresentadas.

Tabela 11: Características da ferramenta

Diâmetro	10 mm
Comprimento	110 mm
Comprimento de corte	50 mm
Nº de dentes	3
Raio de bico	3 mm

Os parâmetros de corte utilizados foram os seguintes:

Tabela 12: Parâmetros de corte utilizados

Velocidade de rotação, n	4000 RPM
Velocidade de avanço	800 mm/min

O CATIA oferece ao utilizador duas trajetórias de maquinagem distintas: “Zig zag” e “one way”.

Os resultados obtidos para cada uma destas trajetórias encontra-se sintetizado na seguinte tabela:

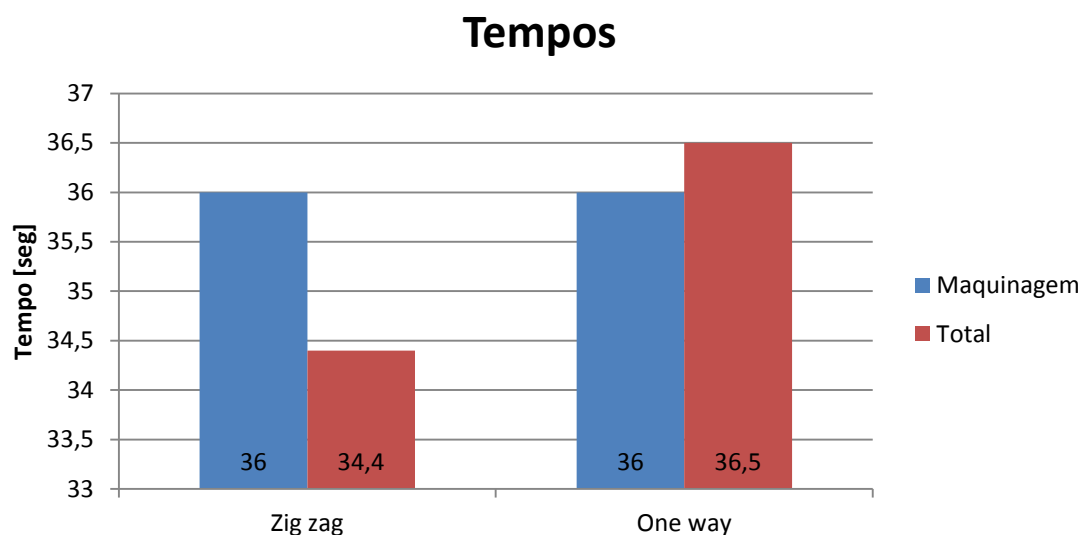


Figura 38: Tempos obtidos para as várias trajetórias

Verifica-se com estes resultados que a trajetória escolhida tem pouca influência no tempo de maquinagem ou no tempo total. Assim, a mesma irá depender de caso para caso, devendo o utilizador escolher aquela que melhor se adequa ao caso em estudo.

O seguinte quadro resumo permite verificar quais as melhores trajetórias para as operações estudadas:

Tabela 13: Quadro resumo das trajetórias de maquinagem

Operação	Estratégia
Abertura de caixa	<i>Outward helical</i>
Facejamento	<i>Back and forth</i>
Desbaste	<i>Zig Zag</i>
Sweeping	<i>Zig Zag</i>
Contorneamento	<i>Zig Zag</i>

No entanto há que ter em atenção que o tempo de maquinagem não é o único fator que determina qual a melhor estratégia a usar. Outro fator preponderante será o acabamento da peça que, para cada trajetória poderá ser diferente. Também estará dependente do tipo de fresagem que se pretende executar: no sentido do avanço ou no sentido contrário do avanço. Enquanto que trajetórias helicoidais garantem sempre o mesmo modo de fresagem, uma trajetória em zig zag já não o consegue garantir. Deste modo, quando o modo de fresagem é importante, o tempo de maquinagem poderá ser sacrificado.

3. Desenvolvimento experimental

O trabalho prático consiste em obter por maquinagem dois componentes aeronáuticos. Estes componentes devem ser obtidos por operações de maquinagem, procedendo-se ao planeamento e preparação de trabalho de modo a obter esses mesmos componentes.

2.1 Aparato experimental

Para a obtenção das geometrias pretendidas, foi necessário a utilização de um centro de maquinagem e, associada a este, um controlador. A máquina utilizada é o centro de maquinagem de 3+2 eixos presente no *NOF (Deckel Maho DMU 50 ECO)*, que está equipada com um controlador *Siemens Sinumerik 810D*. Apesar do referido centro de maquinagem permitir a maquinagem no eixo B e C, apenas foram utilizadas as suas capacidades a 3 eixos..



Figura 39: Centro de maquinagem DMU 50 Eco e respetivo controlador

Tabela 14: Características do centro de maquinagem

Dimensões (comp x larg x alt)	2206 x 2829 x 2426 mm
Dimensão da mesa	630 x 500 mm
Potência do equipamento	18 kW
Capacidade do armazém de ferramentas	16 ferramentas
Velocidade de rotação	8000 RPM
Velocidade de avanço	12 m/min
Peso máximo na mesa	200 Kg

2.2 Materiais e método

O fabrico dos componentes indicados foi feito na liga de alumínio 7050, cujas propriedades poderão ser consultadas no anexo 4.

No que diz respeito às ferramentas, é necessário conhecer primeiramente os parâmetros de corte que deverão ser selecionados para a obtenção dos componentes aeronáuticos. Deste modo, foi feito um levantamento do catálogo do fabricante sueco de ferramentas, *Seco tools*, selecionando ferramentas com revestimentos apropriados para o corte de alumínio². Verificou-se que existem dois fatores decisivos para a escolha dos parâmetros de corte:

- Diâmetro da ferramenta, uma vez que influencia substancialmente qual o valor de avanço a escolher;
- Geometria a cortar que exerce influencia tanto no avanço como na velocidade de corte.

Da análise do catálogo, e escolhendo ferramentas para uso geral de maquinagem (gama *Jabro Solid*®), verificou-se que, segundo a recomendação do fabricante, nem todas as ferramentas desta gama eram indicadas para o corte de alumínio. Por conseguinte, a tabela 15 menciona as referências das ferramentas recomendadas pelo fabricante para o corte do referido material.

Tabela 15: Lista de ferramentas indicadas para o corte de alumínio e respetiva gama de diâmetros

Referência	Gama de diâmetros [mm]
JS 520	4-25
JS 522	6-25
JS 553	2-25
JS 554	3-25
JS 532	1-20
JS 533	1-20
JS 534	2-20



Figura 40: Ferramentas e suas geometrias de corte típicas

O catálogo fornece-nos informações detalhadas para cada uma das ferramentas descritas, detalhando os parâmetros para cada geometria e para operações de desbaste e

² No caso destas ferramentas, trata-se de ferramentas revestidas pelo método PVD “physycal vapor deposition”, cujo revestimento não é divulgado mas, recorrendo a informações atrás descritas neste texto, se pode especular que sejam revestidas por TiAlN.

de acabamento. O estudo dos avanços recomendados pelo fabricante permitiu verificar que o avanço é definido como uma função do diâmetro da ferramenta, sendo que a sua função é exemplificada no seguinte gráfico:

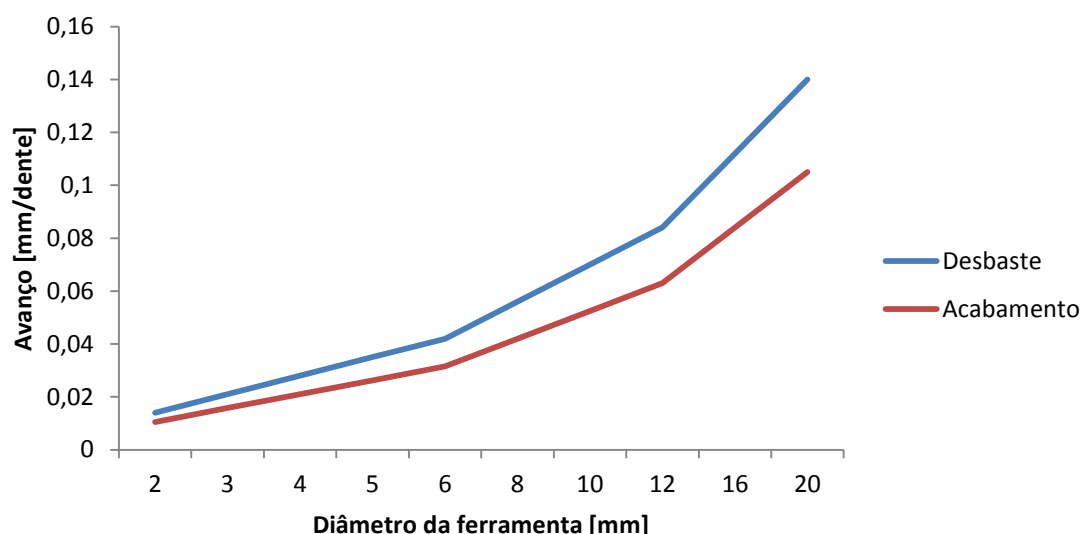


Figura 41: Gráfico da evolução do avanço com o diâmetro da ferramenta

O gráfico da figura 41 foi obtido através da união dos valores dos avanços do catálogo da *Seco Tools*. Deste modo foi possível obter uma evolução dos valores de avanço a selecionar, com base apenas no diâmetro da ferramenta. Isto torna-se especialmente útil quando se determinam equações simples que podem ser introduzidas numa folha de cálculo para se obter rapidamente os valores de avanço sem ter de recorrer à consulta do catálogo. Essas equações estão sintetizadas nas seguintes tabelas:

Tabela 16: Variação do avanço por dente com o diâmetro e tipo da ferramenta (desbaste)

Ferramenta	Corte periférico [mm]	Corte frontal [mm]
JS 520	$a=0.044 D$	N.A.
JS 553	$a= 0.0085 D$	$a=0.007 D$
JS 554	$a= 0.0085 D$	$a=0.006 D$
JS 522	N.A.	$a=0.01 D$
JS 532	$a= 0.006 D$	$a= 0.006 D$
JS 533	$a= 0.007 D$	$a=0.0058 D$

Tabela 17: Variação do avanço por dente com o diâmetro e tipo de ferramenta (acabamento)

Ferramenta	Corte periférico [mm]	Corte frontal [mm]
JS 520	$a=0.028 D$	N.A.
JS 553	$a= 0.0045 D$	$a=0.004 D$
JS 554	$a= 0.0045 D$	$a=0.0024 D$
JS 522	N.A.	$a=0.043 D$
JS 532	$a= 0.0045 D$	$a= 0.0045 D$
JS 533	$a= 0.0053 D$	$a=0.0038 D$

O mesmo catálogo permite obter informações acerca das velocidades de corte e profundidades de corte a utilizar para cada ferramenta. Mais uma vez se verifica que a

profundidade de corte é uma função do diâmetro da ferramenta. A seguinte tabela sintetiza a informação recolhida:

Tabela 18: Variação da velocidade de corte e da profundidade de corte, consoante a ferramenta

Ferramenta	V _c [m/min] (corte frontal)	V _c [m/min] (corte periférico)	P _c [mm] (corte frontal)	P _c [mm] (corte periférico)
JS 520	N.A.	750-850	N.A.	0.02D
JS 553	500-700	650-850	D	0.5D
JS 554	500-700	650-850	D	0.5D
JS 532	600-1000	N.A.	0.02D	N.A.
JS 533	500-700	650-850	0.3D	0.2D
JS 534	500-700	650-850	D	0.5D

As expressões dos gráficos permitem calcular de um modo expedito qual o valor do avanço que se deve escolher (em operações de acabamento e de desbaste), em função apenas do diâmetro da ferramenta. De um modo geral, verifica-se que:

- O avanço varia entre os 0.01 e os 0.35 mm/dente;
- A velocidade de corte varia entre os 500 e os 1000 m/ min
- A profundidade de corte varia entre os 15% do diâmetro da ferramenta e os 100% do diâmetro da ferramenta.

Outro dos parâmetros importantes de referir são os de furação. O mesmo fabricante fabrica brocas para furação de alumínio. Os parâmetros recomendados pelo fabricante variam consoante a velocidade de corte e o diâmetro da broca previamente escolhida. O gráfico seguinte sintetiza os valores dos avanços para as três velocidades de corte recomendadas pelo fabricante (400, 250 e 60 m/min).

Avanços recomendados para várias velocidades de corte

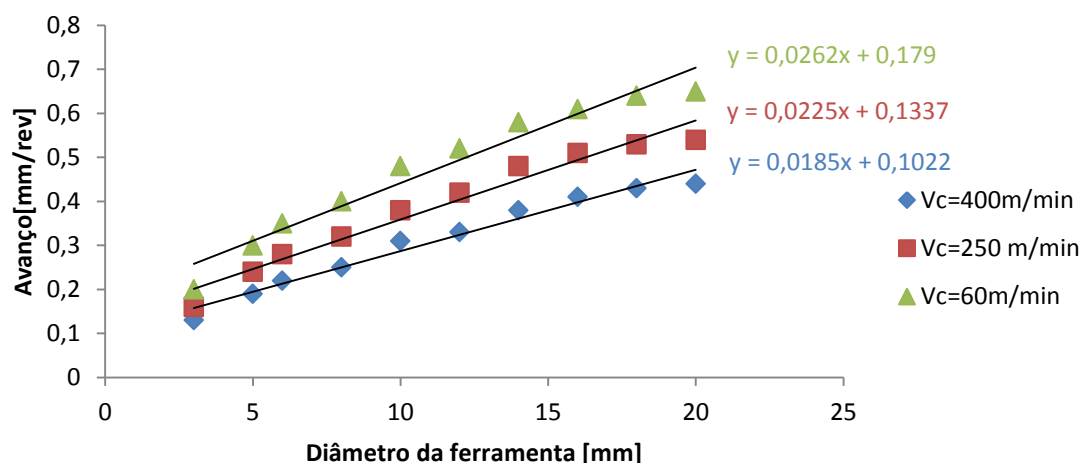


Figura 42: Variação do avanço em função do diâmetro da ferramenta, para várias velocidades de corte recomendadas

Após feito este levantamento, selecionou-se as seguintes ferramentas:

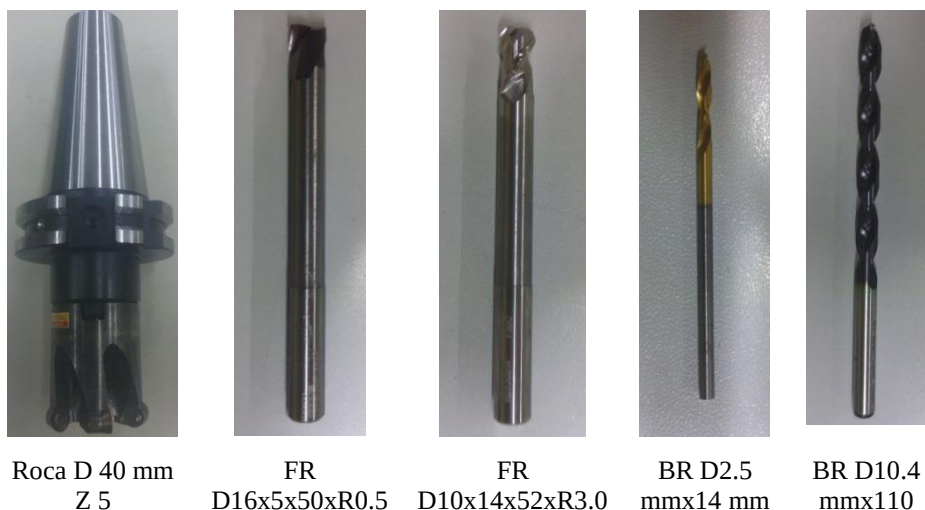


Figura 43: Ferramentas a utilizar na produção das geometrias

Escolhidas as ferramentas, é agora possível determinar a sequência de operações para a obtenção das geometrias. No caso da geometria 1, a sequência de operações é a seguinte:

Tabela 19: Sequência de operações e respetivos parâmetros de maquinagem e tempos da simulação

Nº de operação	Descrição	Ferramenta	Vc [m/min]	v _z [mm/min]	Rotação [RPM]	P _c [mm]	Tempo de maquinagem [min]
1	Desbaste Pesado	1	150	1200	1200	1	46
2	Desbaste ligeiro	2	350	1500	7000	1	2
3	Contorneamento	3	220	0.056	7000	1	1
4	Acabamento	3	220	882	7000	0.5	16
5	ISO parametric machining	3	220	882	7000	0.5	0.2
6	ISO parametric machining	3	220	882	7000	0.5	0.2
7	Facejamento	3	220	882	7000	0.5	0.3
8	Facejamento	3	220	882	7000	0.5	0.3
9	ISO parametric machining	3	220	882	7000	0.5	0.2
10	ISO parametric machining	3	220	882	7000	0.5	0.25
11	Furação	4	60	882	7600	3.5	0.01
12	Furação	4	60	882	7600	1	0.01

A análise dos tempos permite verificar que o tempo de maquinagem para a obtenção da geometria é de aproximadamente 66 minutos. A tabela seguinte consiste na ficha de ferramentas necessárias para realizar as operações de maquinagem do aperto no centro de maquinagem CNC:

Tabela 20: Tabela de ferramentas do aperto em CNC

Nº da ferramenta	Nº de offset	Suporte	Designação da ferramenta
1	01	Cone mecânico	Roca D40mm
2	02	Cone térmico	FR D16x5x50xR0.5
3	03	Cone mecânico	FR D10x14x52xR3.0
4	04	Cone mecânico	BR D2.5X14

Uma vez que a geometria 2 é mais complexa, quando comparada com a geometria 1, foi necessário desenvolver um plano de trabalhos mais complexo. Consequentemente, para se proceder à maquinação deste componente idealizou-se a seguinte sequência de processos, construindo-se para cada um, um programa diferente:

- 1) Desbaste pesado;
- 2) Desbaste ligeiro;
- 3) Acabamento.

Entre cada um dos processos, os parafusos que fixam o bruto de maquinação à base foram desapertados, permitindo o alívio das tensões deixadas na peça em cada operação. O método de fixação será discutido adiante no subcapítulo 3.3.

As tabelas seguintes sintetizam a sequência de operações e respetivos parâmetros de maquinação para cada um dos processos:

Tabela 21: Sequência de operações em desbaste pesado

Nº de operação	Descrição	Ferramenta	Vc [m/m in]	v _z [mm/m in]	Rotação [RPM]	P _c [m m]	Tempo de maquinação em [min]
1	Desbaste Pesado	1	150	1200	1000	4	85

Tabela 22: Sequência de operações em desbaste ligeiro

Nº de operação	Descrição	Ferramenta	Vc [m/m in]	v _z [mm/m in]	Rotação [RPM]	P _c [m m]	Tempo de maquinação em [min]
2	Desbaste ligeiro	2	350	1500	7000	0.6	18
3	Abertura de caixa	3	350	1500	7000	0.6	17

Tabela 23: Sequência de operações na operação de acabamento

Nº de operação	Descrição	Ferramenta	Vc [m/m in]	v _z [mm/m in]	Rotação [RPM]	P _c [m m]	Tempo de maquinagem [min]
4	Facejamento	3	220	882	7000	0.5	4
5	Facejamento	3	220	882	7000	0.5	3
6	Contorneamento	3	220	882	7000	0.5	0.35
7	Contorneamento	3	220	882	7000	0.5	0.1
8	Contorneamento	3	220	882	7000	0.5	0.8
9	Contorneamento	3	220	882	7000	0.5	0.8
10	Contorneamento	3	220	882	7000	0.5	0.8
11	Acabamento	3	220	882	7000	0.5	81
12	Contorneamento	3	220	882	7000	0.5	0.8
13	Contorneamento	3	220	882	7000	0.5	1.9
14	Contorneamento	3	220	882	7000	0.5	1.5
15	Contorneamento	3	220	882	7000	0.5	1.1
16	Furação	4	60	400	7600	2.5	0.01

Da análise dos tempos é possível verificar que a previsão do tempo total para realizar a operação são, aproximadamente, 216 minutos.

A ficha de ferramentas, válida para as operações realizadas, é a seguinte:

Tabela 24: Ficha de ferramentas para os apertos em CNC

Nº da ferramenta	Nº de offset	Suporte	Designação da ferramenta
1	01	Cone mecânico	Roca D40 mm
2	02	Cone térmico	FR D16x5x50xR0.5
3	03	Cone mecânico	FR D10x14x52xR3.0
4	04	Cone mecânico	BR D2.5x14

2.3 Preparação de trabalho

Definidas as ferramentas, torna-se necessário planear a sua fixação à máquina, bem como preparar os brutos de maquinagem. O primeiro passo foi o de decidir a geometria dos brutos de maquinagem e a sua fixação ao centro de maquinagem. Para tal, serão aqui apresentadas várias soluções e, dentro dessas soluções, será selecionada a melhor, após a realização de uma análise *SWOT*.

De um modo sucinto, pode definir-se os seguintes procedimentos para a preparação de trabalho para a obtenção destas geometrias:

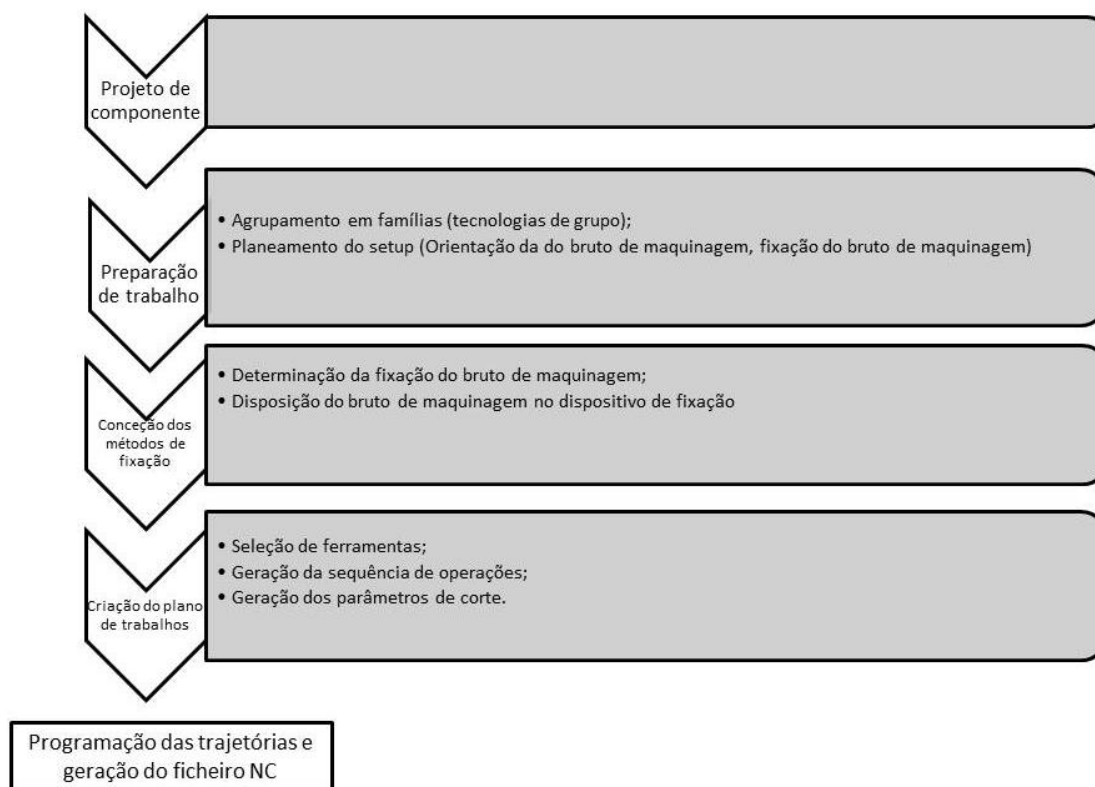


Figura 44 : Metodologia de plano de trabalho sugerida

Em seguida é feita uma análise crítica aos possíveis métodos de fixação do bruto de maquinagem.

1. Fixação por prensa mecânica:

Esta solução implica produzir um bruto de maquinagem com uma altura superior à da peça, com o objetivo de se abrirem rasgos laterais em fresadora convencional. Assim, garante-se o paralelismo dos lados fixos na prensa, garantindo também que esses lados estejam planos.

A sequência de apertos necessários para este tipo de fixação encontra-se sintetizada na seguinte tabela:

Tabela 25: Sequência de apertos para a fixação do bruto de maquinagem por prensa mecânica

Aperto 1	Preparação do bruto de maquinagem (Abertura de rasgos laterais na parte inferior do bruto)
Aperto 2	Maquinagem em centro de maquinagem CNC
Aperto 3	Desbaste da base em fresadora convencional
Aperto 4	Furação em engenho de furar convencional

2. Fixação por adesivo:

Este modo de fixação do bruto de maquinagem à máquina consiste na utilização de uma mesa sacrificial, na qual o bruto seria colado por meio de um adesivo forte. Desta forma, seria necessário o fabrico dessa mesa que seria fixa à mesa da máquina por ligações aparafusadas.

Para este caso, a sequência de apertos a realizar seria a seguinte:

Tabela 26: Sequência de apertos para a fixação do bruto de maquinagem recorrendo a adesivos

Aperto 1	Preparação do bruto de maquinagem (desbaste da base para garantir que esta é plana)
Aperto 2	Maquinagem em centro de maquinagem CNC
Aperto 3	Furação em engenho de furar convencional

3. Fixação por ligação aparafusada/pinças de aperto:

Esta solução consiste no fabrico do bruto de maquinagem com abas largas, de modo a que se possa fixar o bruto à mesa de trabalho, recorrendo a pinças de aperto ou a ligações aparafusadas.

A sequência de apertos para esta solução seria a seguinte:

Tabela 27: Sequência de apertos para a fixação do bruto de maquinagem recorrendo a ligações aparafusadas ou pinças de aperto

Aperto 1	Preparação do bruto de maquinagem em fresadora convencional (desbaste da base para garantir que esta é plana e desbaste lateral para aproximar a forma do bruto de maquinagem à forma final da peça)
Aperto 2	Furação do bruto de maquinagem em engenho de furar
Aperto 3	Maquinagem em centro de maquinagem CNC
Aperto 4	Desbaste da base em fresadora convencional
Aperto 5	Furação em engenho de furar convencional

A análise *SWOT* destas três opções resulta no seguinte:

Tabela 28: Análise SWOT das várias soluções propostas

Solução	Pontos fortes	Pontos fracos
1	Solução simples; Poucas operações de preparação do bruto de maquinagem.	Tempo de preparação do bruto de maquinagem; Nº de apertos
2	Reduzido número de apertos	Requer o fabrico de uma mesa sacrificial; Adesivo pode não fixar bem o bruto, levando à sua queda e danificação
3	Método de fixação robusto	Requer muita preparação do bruto de maquinagem; Nº de apertos elevados

Assim, a solução mais simples e que garante uma eficaz fixação do bruto de maquinagem é a solução 1, apenas porque o número de peças a produzir é reduzido (um exemplar de cada geometria).Efetivamente reduz-se o desperdício de material e, simultaneamente, o tempo de preparação do bruto de maquinagem. Posto isto, este foi o método de fixação utilizado para o fabrico das peças.

Após a decisão tomada acerca do método de fixação dos brutos, procedeu-se ao seu fabrico. No entanto, dado que as geometrias são fisicamente distintas entre si, o método de fixação na prensa mecânica deverá ser substancialmente diferente entre elas.

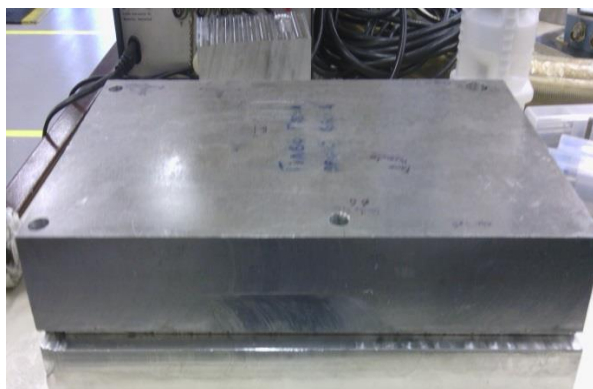
Quanto à geometria 1, dado tratar-se de uma geometria simples e de pequena dimensão, cujas paredes da peça têm uma espessura razoável (5 mm), pode ser simplesmente apertada recorrendo à prensa mecânica.

Quanto à geometria 2, dado tratar-se de uma peça com dimensões elevadas e onde a espessura das paredes é reduzida (2.5 mm), há ter alguma precaução acerca dos empenos durante o processo de maquinagem bem como a fixação posterior na fresadora convencional para o desbaste da base da peça. Assim, para o caso da geometria 2 foi construída uma base na qual o bruto foi aparafusado³. Utilizando este aparato e após o ciclo de desbaste, a peça foi desaparafusada de modo a aliviar tensões. Para a realização das operações de acabamento, os parafusos foram novamente apertados. Também com o objetivo de reduzir os empenos, o bruto de maquinagem da geometria 2 tem uma sobre espessura de 20 mm na base, de modo a garantir maior rigidez estrutural. Esse material será removido posteriormente ao processo de maquinagem em fresadora convencional.

Os brutos obtidos foram os seguintes:



Bruto da geometria 1



Bruto da geometria 2 (com base)

Figura 45: Brutos maquinados

A dimensão dos brutos de maquinagem para as várias soluções apresentadas pode ser consultada no anexo 5.

Quanto à fixação das ferramentas, estas foram feitas recorrendo a cones mecânicos, tendo havido, posteriormente, a necessidade de transferir as ferramentas para cones térmicos.

³ Recorrendo a parafusos de cabeça cónica

2.4 Plano de ensaios

De modo a validar o estudo realizado, foram maquinadas as seguintes geometrias:

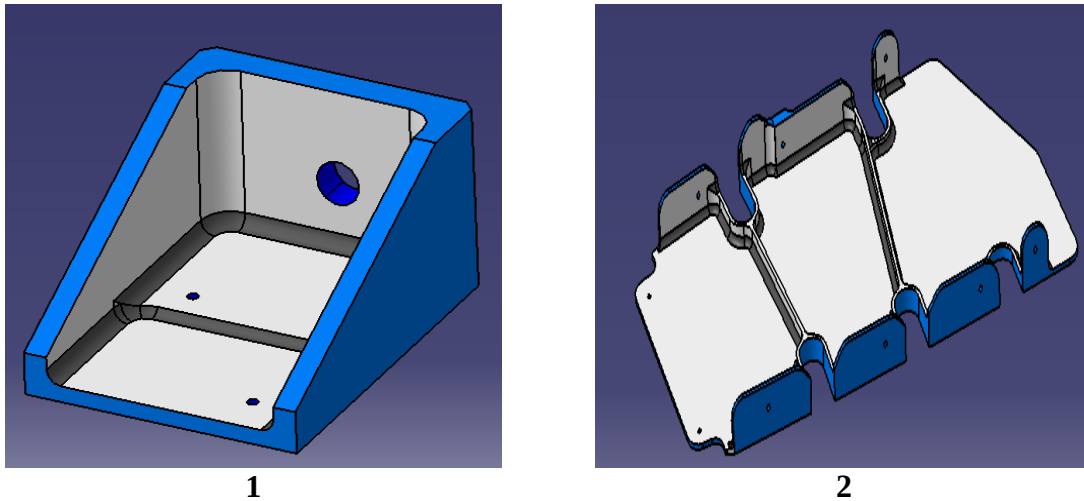


Figura 46: Geometrias a maquinar

A seleção destas peças prendeu-se com o facto de serem as únicas que permitiam serem obtidas a 3 eixos. Para a obtenção destas geometrias procedeu-se ao planeamento e fabrico dos brutos de maquinagem, bem como à seleção de ferramentas e parâmetros para efetuar o corte.

Como se verifica, as duas geometrias são geometricamente diferentes. A geometria 1 é uma geometria cujas dimensões são reduzidas e cuja espessura é relativamente elevada, quando comparada com as restantes dimensões. Já a geometria 2 é uma geometria esbelta, com dimensões de espessura muito reduzidas, quando comparadas com o seu comprimento ou largura. Assim, a geometria 1 poderá ser obtida recorrendo a dispositivos de fixação standard e parâmetros de corte catalogados enquanto que a geometria 2 irá requerer dispositivos de fixação personalizados e os parâmetros de corte serão revistos, de modo a reduzir as forças de corte e, consequentemente, o empeno.

4. Resultados e discussão

Este capítulo expõe os resultados obtidos para as duas geometrias. Estes resultados estão discriminados por geometria.

Para a obtenção das geometrias, foi necessário pós processar as trajetórias programadas. Para tal, recorreu-se aos pós processadores já incorporados no *CATIA V5*, que se mostraram eficazes no pós processamento a 3 eixos. No entanto, foi necessário proceder a algumas modificações a nível do pós processamento que podem ser consultados nos anexos 2 e 3.

4.1 Influência das geometrias na programação

Como referido anteriormente, as geometrias 1 e 2 são distintas entre si, pelo que mereceram um diferente tratamento em termos de preparação de trabalho e parâmetros de corte. A geometria 1, por ser mais simples e por apresentar uma espessura razoável, não se esperava que se verificassem empenos. Como tal, os dispositivos de fixação utilizados foram *standard*, isto é, foi fixa através de prensa mecânica. Já a geometria 2, por ser muito esbelta, era expectável que corresse empenos, pelo que se construiu um dispositivo de fixação personalizado e se deixou uma sobre espessura de maquinaria considerável (20 mm).

Durante a maquinaria da geometria 1 surgiram alguns obstáculos. O primeiro surgiu aquando da operação de desbaste. Inicialmente estava prevista a utilização de uma fresa de 16 mm e 2 dentes. No entanto, a aplicação desta fresa no processo mostrou ser desastrosa. Apesar de todos os parâmetros de corte utilizados serem recomendados pelo fabricante, esta mesmo assim partiu-se após cortar apenas 6 mm de espessura. Essa mesma fratura deveu-se a um comprimento em balanço da ferramenta muito elevado, que levou a que esta vibrasse excessivamente. A vibração excessiva desta promoveu o desaperto do cone mecânico, fazendo com que se afundasse no material levando à sua fratura. Decidiu-se então a substituição desta por uma fresa de pastilhas intercambiáveis (roca), de 40 mm de diâmetro e 5 pastilhas para realizar a operação de desbaste. A fresa de 16 mm foi usada apenas para complementar a operação de desbaste pesado, realizando um desbaste ligeiro. Também o bruto de maquinaria sofreu alterações, de modo a que a área de aperto na prensa aumentasse, diminuindo assim a vibração deste.



Figura 47: Sulco deixado aquando da fratura da ferramenta

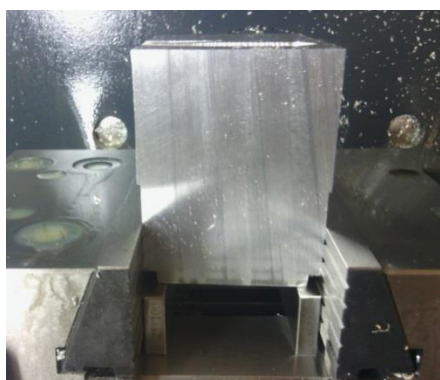


Figura 48: Novo aperto do bruto de maquinagem (à esquerda) e Roca utilizada para desbaste (à direita)

Como medida complementar às tomadas acima, o modo de fresagem foi alterado nos ciclos de desbaste. Ao invés de se usar o sentido do avanço, utilizou-se o sentido convencional (contrário ao do avanço). Deste modo, a ferramenta ataca o material da espessura mínima até à espessura máxima, reduzindo a instabilidade do corte. A conjugação destes fatores levou a que fosse completado com sucesso o ciclo de desbaste desta geometria, registando-se apenas problemas quando a fresa de 16 mm era solicitada a cortar com todo o seu diâmetro, situação em que se verificou uma excessiva vibração.

A operação de acabamento foi realizada com uma fresa de 10 mm de diâmetro com raio de bico de 3 mm. A utilização do mesmo justificou-se uma vez que a concordância entre as paredes verticais e as paredes horizontais da peça era feita com um boleado de 3 mm de raio. Mais uma vez, devido à dimensão das paredes da peça, foi utilizada uma versão longa desta ferramenta. As operações de acabamento decorreram sem grandes problemas com a exceção do fundo da peça que, sendo a ferramenta solicitada a cortar com todo o seu diâmetro, provocou uma vibração excessiva na mesma.

Após o primeiro aperto (CNC), a geometria obtida foi a seguinte:

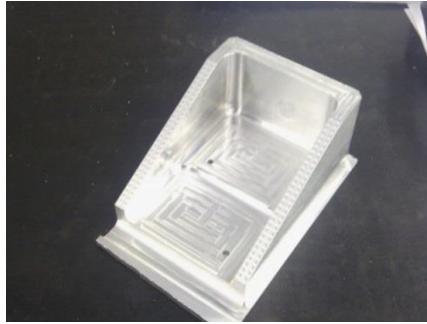


Figura 49: Geometria obtida à saída do centro de maquinagem

Para concluir a peça foi necessário um aperto adicional em que o material excedente na base da peça foi removido. Essa remoção passou por duas etapas: uma primeira em que se removeu material por corte em serrote mecânico e uma segunda em que se removeu o material restante em fresadora convencional. Também se procedeu à sua furação em engenho de furar convencional.



Corte em serrote mecânico



Desbaste em fresadora convencional

Figura 50: Acabamento da peça

Após as operações acima referidas, a peça final obtida foi a seguinte:

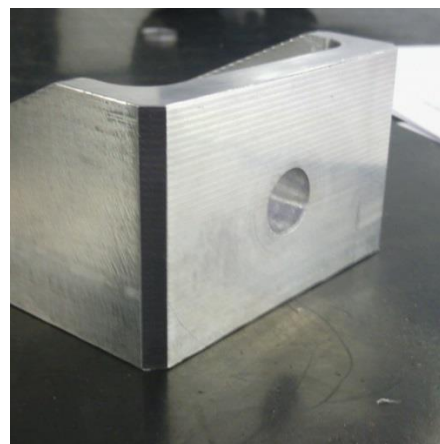


Figura 51: Peça obtida

Sem contar com as operações em máquinas ferramenta convencionais, a geometria 1 levou aproximadamente 2 horas a ser maquinada. Este tempo, muito superior ao da simulação, deveu-se à necessidade de se reduzir o valor do avanço, devido ao problema da vibração excessiva das ferramentas.

Verificou-se nesta geometria que a sua superfície apresenta alguns riscos, assim como um mau acabamento. Mais uma vez, a vibração excessiva da ferramenta teve um papel preponderante, dado que levou à marcação da superfície da peça, em especial nas zonas inferiores da peça, zona em que todo o diâmetro da ferramenta foi solicitado ao corte.

Tendo em linha de conta os erros cometidos na geometria 1, e com o objetivo de reduzir ao máximo a vibração das ferramentas, decidiu-se reduzir o comprimento em balaço das fresas de 16 e 10 mm, bem como reduzir as profundidades de corte máximas que ambas podem cortar para 0.6 e 0.5 mm respetivamente. Também as trajetórias de maquinação foram aqui otimizadas, em especial as trajetórias em que a ferramenta não está efetivamente a cortar, permitindo uma redução de tempo substancial no processo. A título de exemplo, para a operação de desbaste com a roca de 40 mm, o tempo foi reduzido de 2h15 min para 1h 27 min por apenas se ter otimizado as trajetórias da ferramenta em vazio.

Como explicitado anteriormente, a maquinação desta peça passou por três fases distintas: uma de desbaste pesado com uma roca de 40 mm, outra de desbaste ligeiro com uma fresa de 16 mm e ainda uma terceira de acabamento com uma fresa de 10 mm.

A figura seguinte representa o estado da geometria após as várias fases de maquinação:



Após desbaste pesado

Após desbaste ligeiro

Após acabamento

Figura 52: Estágios da produção da geometria 2

A operação de desbaste com a roca ocorreu sem incidentes. No entanto, aquando do desbaste com a fresa de 16 mm, em especial na operação de abertura de caixa, verificou-se uma vibração excessiva quando a ferramenta entrava no material, em especial durante a primeira passagem em que todo o diâmetro da ferramenta era solicitado a cortar. Este facto

levou a que apenas se operasse a 4 % do avanço, aumentando exponencialmente o tempo de maquinagem.

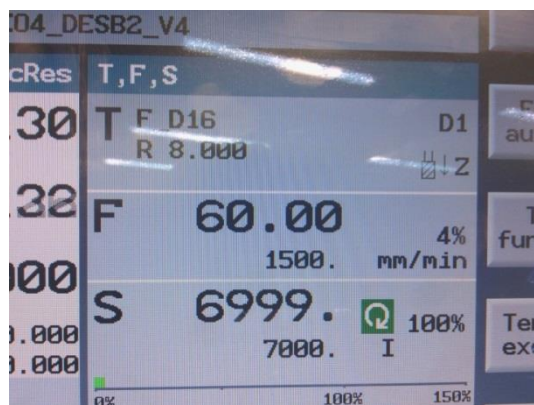


Figura 53: Redução do avanço na operação de abertura de caixa

No que diz respeito à operação de acabamento, a utilização de um *offset* (distância imposta entre a ferramenta e a parede da peça) errado levou a que o facejamento numa das faces da peça não ficasse bem feito, tendo sido feito, posteriormente, um novo facejamento com o *offset* correto. Verificou-se também alguma vibração quando a ferramenta foi solicitada a cortar com todo o seu diâmetro. Verificou-se também que durante a operação de acabamento, a ferramenta fazia “*plunge milling*” (fresagem de mergulho), o que é ineficiente em termos de tempo e deixa um mau acabamento na peça. Ainda durante a operação de acabamento, foi feita uma operação de contorneamento. Essa mesma operação levou à destruição de uma das paredes da peça. Essa destruição foi devida a um erro de programação dos *offsets* da ferramenta que levou à colisão desta última com a própria peça.

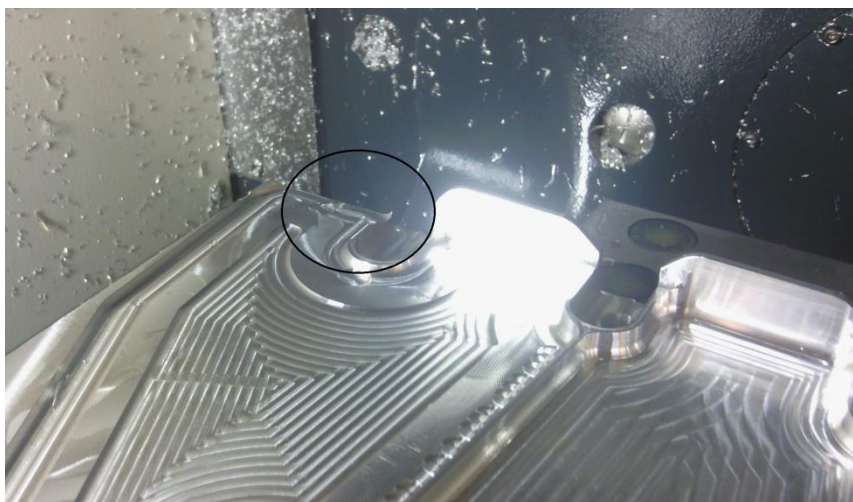


Figura 54: Localização da parede destruída

Após a conclusão do programa, verificou-se que o acabamento da peça era inadequado e que o resultado da operação de “*plunge milling*” não foi removido através da operação de contorneamento. A vibração da ferramenta ao longo das operações de acabamento (fresa de 10 mm), em ambas as geometrias, levou ao desaperto do cone

mecânico. Consequentemente, a ferramenta retraiu aproximadamente 4 décimos de mm, fazendo com que o acabamento não fosse concluído. Corrigida a altura da ferramenta na máquina, procedeu-se a nova maquinação dos contornos sendo que o seu acabamento revelou-se bem-sucedido.

O grande problema da construção desta geometria ocorreu não na maquinação da peça no centro de maquinagem mas sim no desbaste do material excedente na base. A solução utilizada implicou o uso de adesivo para fixar a peça a uma base, que estaria fixa à mesa da fresadora convencional por grampos.

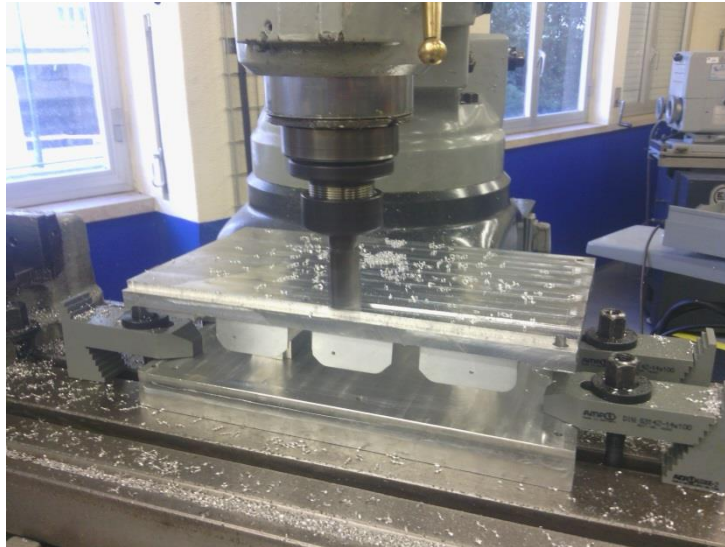


Figura 55: Desbaste da base da peça em fresadora convencional

O desbaste ocorreu sem problemas até que a espessura da peça atingiu os 5 mm. A partir desta altura, a rigidez da peça não foi suficiente para evitar as vibrações impostas pelo processo, dando-se o desprendimento da peça. A operação de colagem foi efetuada mais 3 vezes, sempre sem sucesso. Assim, as dimensões para a espessura da base não foram cumpridas.

Após o desbaste em fresadora convencional (aperto 3), a geometria obtida foi a seguinte:

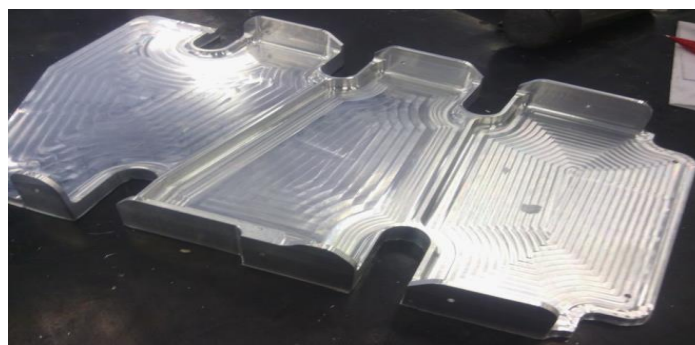


Figura 56: Geometria final obtida

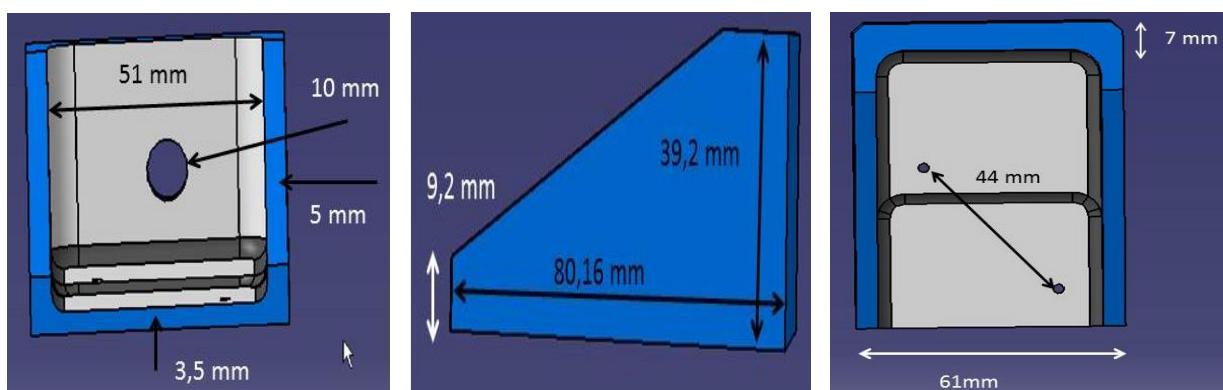
Posto isto, fica em falta a verificação das dimensões finais da peça obtida. Para tal, é necessário conhecer as dimensões da peça modelada que estão representadas na figura seguinte:

Da análise das figuras acima, imediatamente se percebe o efeito de não se ter conseguido desbastar todo o material da base, sendo que a altura da peça real é 2.4 mm superior ao que deveria ser. Quanto às restantes dimensões, verificam-se alguns erros nas espessuras da peça na casa dos décimos de mm. A causa mais provável desses erros foi o dispositivo de fixação utilizado para a fresa utilizada no acabamento (10 mm), que se tratava de um cone mecânico. Esse cone, para além de não ser capaz de anular o efeito do batimento radial, também se desapertou ao longo do processo de corte, exponenciando o efeito do batimento radial e causando um empeno à ferramenta. Esse facto é visível na figura acima, em que uma parede tem 2.1 mm de espessura (ao invés de 2) e a parede imediatamente ao seu lado tem 1.9 mm de espessura, o que significa que o movimento elíptico da ferramenta causado pelo batimento radial levou a uma maior remoção de material numa das paredes e uma redução menor na outra.

Tal como a geometria 1, também o tempo de maquinagem desta geometria não corresponde ao da simulação. Mais uma vez, o motivo dessa diferença de tempo deveu-se à redução do avanço que foi necessário realizar devido a problemas excessivos de vibração.

Em relação ao acabamento superficial, verificou-se que, ao invés da geometria 1, a geometria 2 não apresentou defeitos superficiais. A ajudar este facto deveu-se o ajuste dos parâmetros de corte que permitiram atenuar a vibração da ferramenta

No que diz respeito às dimensões da peça, estas deveriam coincidir com as dimensões especificadas no CAD, as quais se apresentam na figura seguinte:



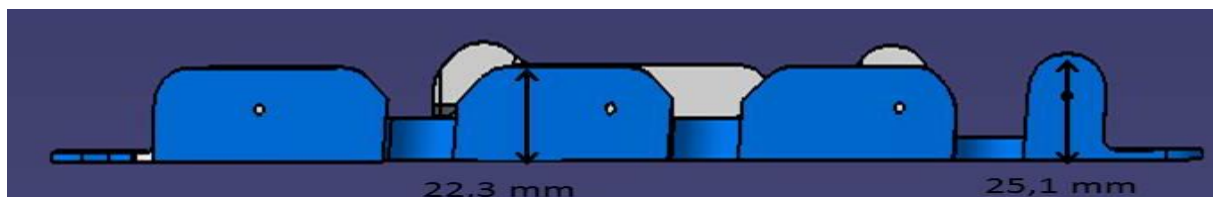
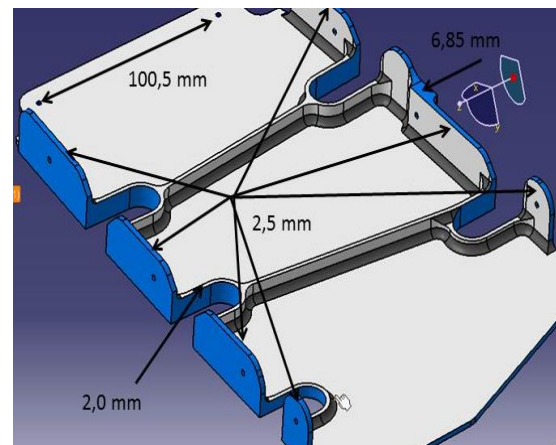
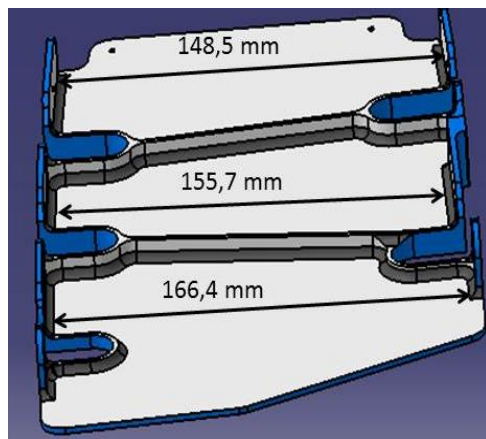
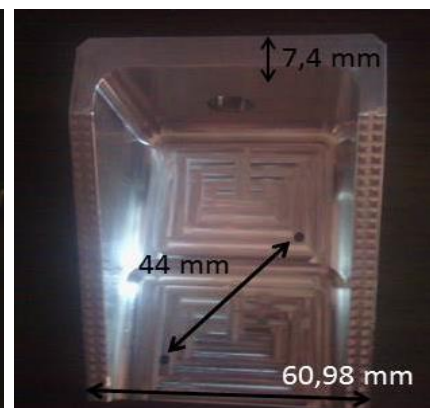
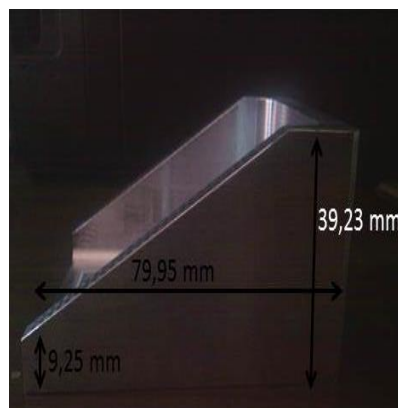
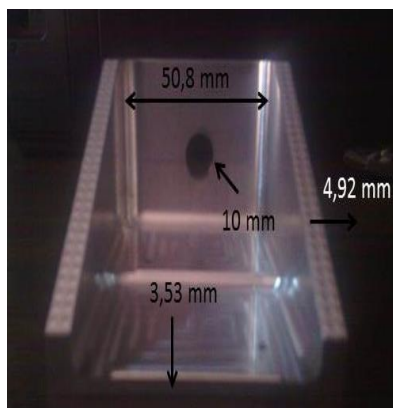


Figura 57: Cotas definidas no ficheiro CAD

As dimensões registadas nas peças foram as seguintes:



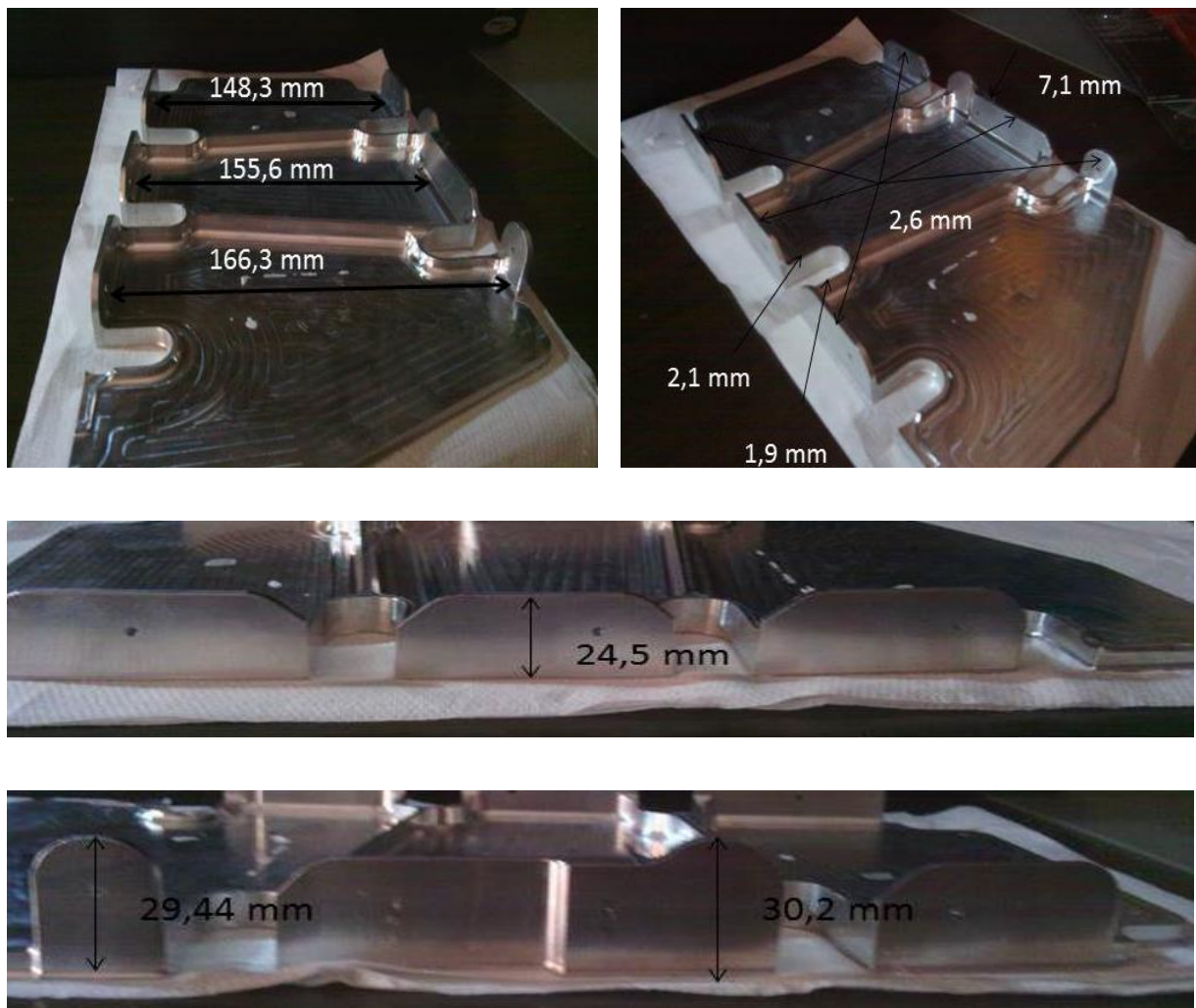


Figura 58: Dimensões registadas na peça maquinada

A figura 57 permite verificar que o controlo dimensional da geometria 1 não varia mais do que uns décimos, não variam mais do que alguns décimos. A medida mais díspar é a da espessura da parede vertical que contém o furo de 10 mm de diâmetro, cuja diferença se situa nos 4 décimos de mm. As restantes medidas variam em menos de dois décimos. As causas desta variação poderão estar na própria fixação da ferramenta. Quanto à geometria 2 (figura 58), observou-se problemas significativos do desvio entre o CAD e a medida real, o que obrigou a alteração das metodologias de preparação de trabalho de forma a minimizar a recuperação elástica.

4.2 Avaliação das metodologias e preparação de trabalho

A obtenção das geometrias acima permite verificar que os parâmetros de corte utilizados foram adequados. Verificou-se alguma vibração que se deveu acima de tudo aos dispositivos de fixação das ferramentas bem como do elevado comprimento em balanço destas.

No entanto, verifica-se que o planeamento de trabalho foi eficaz. Com exceção da escolha da fresa de 16 mm, as ferramentas selecionadas foram eficazes, bem como os parâmetros de corte a elas associadas. A utilização das equações determinadas para os valores de avanço foram de extrema utilidade, reduzindo drasticamente o tempo de pesquisa de parâmetros de corte. Também a sequência de operações e a aplicação das trajetórias de maquinagem mais rápidas permitiram a obtenção das peças de uma forma expedita, sendo o tempo de maquinagem apenas prejudicado pela redução da velocidade de avanço que se verificou ser necessária devido à excessiva vibração da ferramenta.

Também os dispositivos de fixação foram eficazes, em especial na geometria 2, que era mais passível de sofrer empenos. A definição dos ciclos de desbaste e acabamento juntamente com desaperto dos parafusos de fixação entre operações permitiu que não se verificassem empenos nesta geometria. Para este facto também contribuiu a sobre espessura de material deixada na base do bruto de maquinagem. Apenas se verificou dificuldades do desbaste da base da peça, para o qual se torna necessário um planeamento mais profundo.

Assim, verificou-se que a preparação de trabalho proposta permitiu obter as geometrias, recorrendo a um método sistemático. Também permitiu distinguir claramente a natureza das duas geometrias, enquadrando-as numa metodologia conforme as suas esbeltezes, recorrendo a métodos das tecnologias de grupo, permitindo poupar tempo sistematizando métodos a aplicar em geometrias semelhantes.

Com estes dois casos de estudo foi possível validar os parâmetros de corte estudados acima.

Também a otimização das trajetórias de maquinagem, que permitiu poupar tempo de maquinagem e, conseqüentemente, tempo de operação de máquinas, contribuindo para uma redução de custos.

Em suma, os principais contributos deste trabalho relacionam-se com o conhecimento dos parâmetros de corte para as ligas de alumínio e sua otimização em termos de consulta de parâmetros, bem como a otimização de trajetórias de maquinagem, no que diz respeito à redução do tempo de execução. Também o desenvolvimento de um dispositivo de fixação para a maquinagem de peças esbeltas, bem como a sistematização dos procedimentos para a preparação de trabalho, revelam-se como importantes contributos no âmbito deste estudo. A aplicação das tecnologias de grupo para geometrias similares também representa um contributo importante deste trabalho, na medida que, geometrias semelhantes a estes dois casos de estudo irão partilhar procedimentos semelhantes aos expostos

neste

documento.

5. Conclusões e trabalho futuro

De um modo global verifica-se que as geometrias foram obtidas com algum sucesso. Este facto deveu-se em grande parte à utilização do *software* CATIA V5 que, através da sua interface simples e de fácil utilização, permitiu programar com relativa facilidade as trajetórias de maquinagem necessárias. Com a discriminação das operações em operações elementares (caso de operações de facejamento, abertura de caixa, etc), o *software* permite, de forma fácil e intuitiva, produzir geometrias complexas, como as que aqui se apresentam. Também a interface gráfica de seleção de parâmetros e trajetórias presente nos menus das operações elementares permite facilmente a programação destas. Assim sendo, pode-se aferir que o CATIA V5 é um *software* de CAM de muito fácil interação, ideal para a indústria aeronáutica.

Após o desenvolvimento dos programas, bem como da execução dos mesmos, obteve-se as geometrias pretendidas. Não obstante, a obtenção de ambas passaram por várias dificuldades.

Durante a maquinagem das geometrias verificou-se uma excessiva vibração das ferramentas, que promoveu mau acabamento superficial, em especial na geometria 1. Tendo conhecimento deste facto, adaptou-se os parâmetros de modo a que o mesmo não se repetisse na geometria 2, sendo que se obteve sucesso neste campo. Numa tentativa de reduzir as vibrações provocadas no corte, o bruto de maquinagem da geometria 1 sofreu alterações. Ao invés de ser fixo através dos rasgos abertos anteriormente, procedeu-se a uma retificação das paredes laterais e utilizou-se calços. Deste modo, a área de contacto entre a prensa e o bruto de maquinagem foi maior, levando a um aperto mais estável.

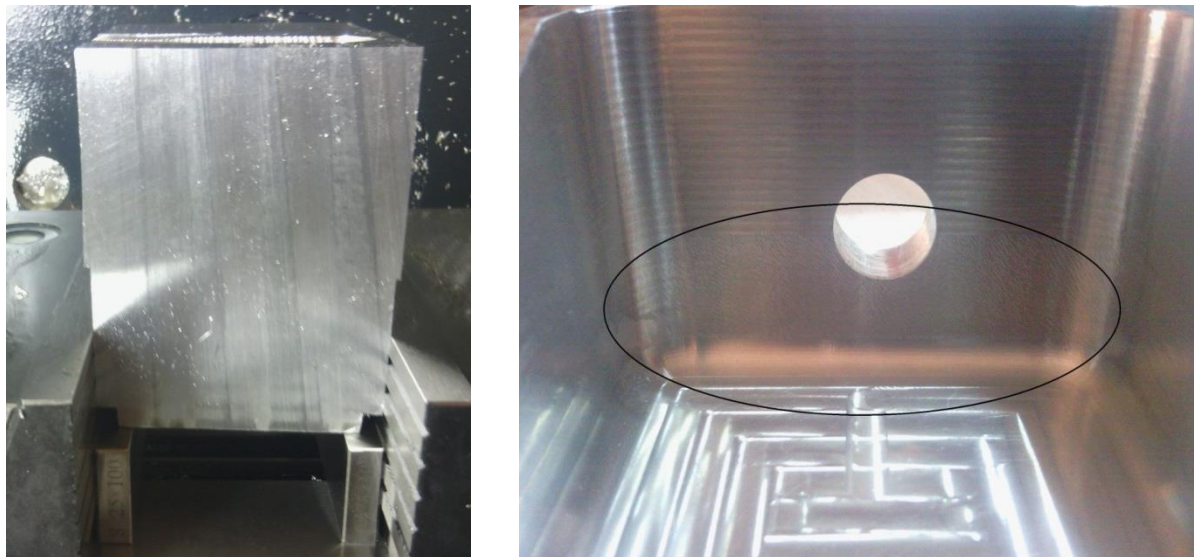


Figura 59: Novo aperto do bruto de maquinagem e marcas deixadas pela vibração da ferramenta

Como foi referido atrás, a vibração excessiva da ferramenta promoveu um mau acabamento superficial da peça, muito visível em algumas zonas da mesma.

Para a solução deste problema, as medidas a serem adotadas passariam por substituir o cone mecânico utilizado na ferramenta de acabamento por um cone térmico, reduzindo assim o batimento radial. Outras medidas poderiam passar pela redução da profundidade de corte, o que promove a própria redução das forças de corte e atenua a vibração; a utilização de uma ferramenta com um comprimento em balanço inferior, de modo a reduzir a instabilidade da ferramenta também traria benefícios na atenuação da vibração da ferramenta.

Outro aspecto em relação a esta geometria são as suas paredes diagonais. Idealmente estas paredes deveriam sofrer uma operação de facejamento feita a 5 eixos. Como a maquinação da peça estava a ser feita a três eixos, tal não era possível, pelo que se implementou uma operação em que a fresa se deslocava paralelamente a essas paredes.



Figura 60: Marcas deixadas pela operação de acabamento nas paredes diagonais

Apesar desta operação, foram deixados “castelos” na peça, como se vê na figura 60. Estes castelos podiam ser minimizados reduzindo drasticamente o passo longitudinal da ferramenta, comprometendo também o tempo de maquinação.

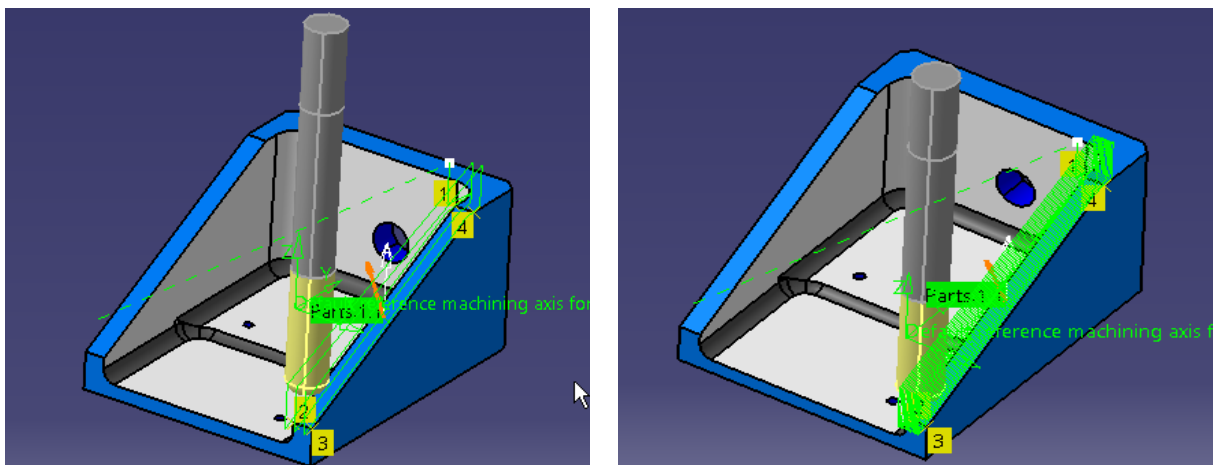


Figura 61: Alteração do passo longitudinal da ferramenta

Como se vê na figura 61, o passo longitudinal utilizado para maquinar a peça é o da figura da direita em que foram feitas 2 passagens longitudinais. A solução para a redução

dos castelos encontra-se na figura da esquerda, em que são feitos 10 passagens longitudinais. O tempo de maquinagem sobe de 17 segundos para 55 segundos. No entanto, a rugosidade destas paredes nunca será melhor do que se fosse feita com uma operação de facejamento a 5 eixos.

Um aspeto curioso é o facto de a operação de acabamento ter deixado uma marca na parede lateral da peça. Inicialmente, essa marca foi tomada como defeito do material ou mesmo da programação mas, ao marcar-se a posição do furo de 10 mm que teria de ser realizado, foi constatado que essa marca era na verdade, a zona onde a furação deveria ser feita.

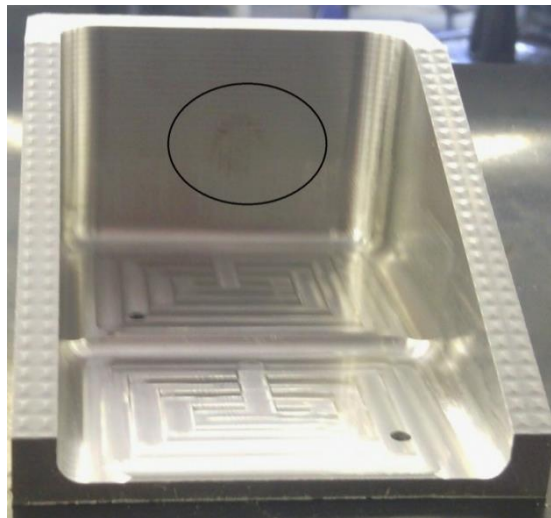


Figura 62: Marca deixada durante a operação de acabamento

O aparecimento desta marca facilita bastante a operação de furação em engenho de furar convencional, dado que a localização do furo sai marcada à saída do centro de maquinagem. No entanto, é sempre aconselhável a verificação das coordenadas do furo.

A figura 62 também denota que na operação de facejamento, foi deixado um ligeiro castelo na face de saída da peça. O aparecimento deste castelo está relacionado com o facto de o facejamento ter sido feito com uma fresa que possui um raio e bico de 3 mm, sendo pois necessário dar um *offset* (distância imposta entre a ferramenta e a peça) ao programa de modo a compensar esse facto. Este erro poderia ser neutralizado recorrendo-se a *softwares* de simulação, como é o caso do *VERICUT*.

Durante a maquinagem da geometria 2 não se verificou tanta vibração, consequência da aplicação das soluções atrás referidas. No entanto, e em especial na operação de abertura de caixa, a vibração foi excessiva nomeadamente quando esta era solicitada a cortar com todo o seu diâmetro. A solução para este problema passaria pela substituição da fresa, por um modelo mais curto ou, num caso extremo, substituição da fresa por outro modelo diferente.

As dimensões e fisionomia desta geometria potenciavam o aparecimento de empenos na peça, tendo sido por isso desenvolvido um sistema de fixação especial em que o bruto de maquinagem era aparafusado a uma base sacrificial. Após a operação de desbaste ligeiro, foram registadas as dimensões gerais da peça antes e depois de se desapertarem os parafusos. Neste ponto, não se verificou alterações nas referidas dimensões. Estas medições vêm mostrar que a solução conjunta de desapertar o bruto após o desbaste pesado aliado à utilização de 20 mm de material excedente na base permitiram neutralizar o aparecimento de empenos.

Durante a operação de desbaste ligeiro, em especial na operação de “*advanced finishing*” (acabamento avançado), verificou-se que a ferramenta executava trajetórias em *plunge milling* (fresagem de mergulho) que, para além de ser ineficiente em termos de tempo de maquinagem, promoveu um mau acabamento na peça obrigando a realização de uma operação de correção destas zonas. Não havendo possibilidade de alteração desta operação (a operação de “*advanced finishing*” vem predefinida no *software*”), então esta deverá ser substituída pela operação “*Z level*” (nível Z).

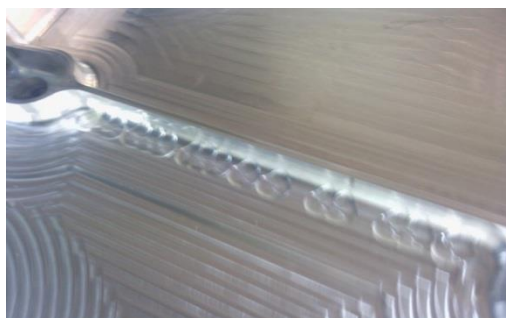


Figura 63: Mau acabamento deixado na peça pela operação de *plunge milling*

Recorrendo à operação “*Zlevel*”, a ferramenta não faz “*plunge milling*”, neutralizando a necessidade de se realizar operações de contorneamento após a operação de acabamento.

Durante a execução do programa, verificou-se que as paredes laterais desta geometria apresentavam uma ligeira inclinação, o que levou a que a ferramenta deixasse alguns defeitos nessas paredes.



Figura 64: Defeitos deixados na peça devido à inclinação das paredes

A melhor solução para evitar estes defeitos seria maquinar a peça a 5 eixos. Se tal não for possível, deverá ser colocado um *offset* nas paredes em questão, de modo a garantir que a ferramenta não toca nessas paredes. Consequentemente, o boleado entre a parede vertical e a base da peça irá ficar com um ligeiro defeito⁴.

Como se verificou anteriormente, o desbaste da base da peça (após CNC), não foi efetuado com sucesso. Assim, uma nova solução de fixação da peça deverá ser concebida, como por exemplo deixar na peça umas “orelhas” furadas que servirão para proceder a ligação mecânica da peça a uma base, proporcionando maior estabilidade no corte, evitando vibrações. Deste modo, consegue-se igualmente minimizar as recuperações elásticas da peça, com a vantagem de se conseguir uma ligação mecânica mais robusta.

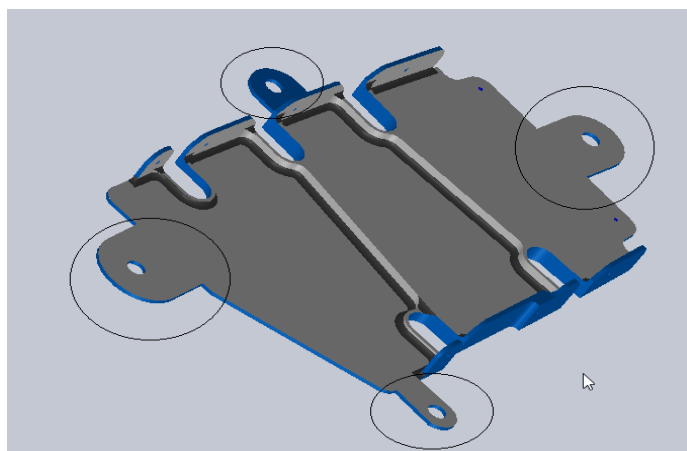


Figura 65: Inclusão de orelhas furadas na peça

Estas “orelhas” serviriam quer para aparafusar o bruto de maquinagem à base, durante a maquinação do componente no centro de maquinagem, quer para fixação da peça a uma base, para desbaste em fresadora convencional. Logicamente, dado que se trata de uma ligação mecânica, o risco de a peça se soltar durante o desbaste da base é diminuto. As orelhas seriam posteriormente cortadas, sendo a zona onde elas assentavam polidas com lixa para proceder ao seu acabamento.

De um modo sucinto, verificou-se que a maquinagem das peças no centro de maquinagem (CNC) correu dentro do previsto, sendo possível a obtenção das geometrias pretendidas. Verificou-se, igualmente, que os defeitos encontrados nas peças se deviam às ferramentas e à sua vibração excessiva, o que pode ser evitado com utilização de cones térmicos mais robustos, menores comprimentos em balanço das ferramentas, profundidades de corte mais baixas ou, em casos extremos, recorrendo à substituição da ferramenta por outra mais capaz de desempenhar o corte a que se está a solicitar.

Quanto ao rigor dimensional das peças, estas apresentavam diferenças em relação ao modelo CAD na ordem dos décimos de milímetro. Essas diferenças poderão ser

⁴ O boleado não será feito por completo, havendo uma descontinuidade entre o boleado e a base da peça

neutralizadas recorrendo, mais uma vez, a cones térmicos para fixação das ferramentas usadas no acabamento. Assim, o fenómeno de batimento radial vem reduzido, sendo possível alcançar um maior rigor dimensional.

Quanto à fixação das peças, os métodos aplicados às geometrias 1 e 2 revelaram-se eficazes, não se registando empenos nas peças. No entanto, apesar do desbaste da base da geometria 1 ter sido realizada sem problemas, o desbaste da base da geometria 2 não foi concluído eficazmente, tendo sido necessário repensar o método de fixação do bruto de maquinagem.

Também se verificou que o estudo e sistematização dos parâmetros de corte, bem como a aplicação de um método de trabalho sistemático contribuiu para a obtenção com sucesso destas geometrias, que, aliadas ao estudo das trajetórias de maquinagem, permitiu uma redução significativa do tempo de operação.

Corrigindo estes pontos, a maquinagem destes componentes deverá ser feita de um modo mais eficaz, obtendo-se assim as geometrias pretendidas, com as dimensões exigidas no projeto dos componentes.

Quanto à preparação de trabalho, o esquema apresentado no ponto 1.4 deste documento poderá agora ser quantificado, no que diz respeito às sobre espessuras de material e na percentagem de redução dos parâmetros de corte:

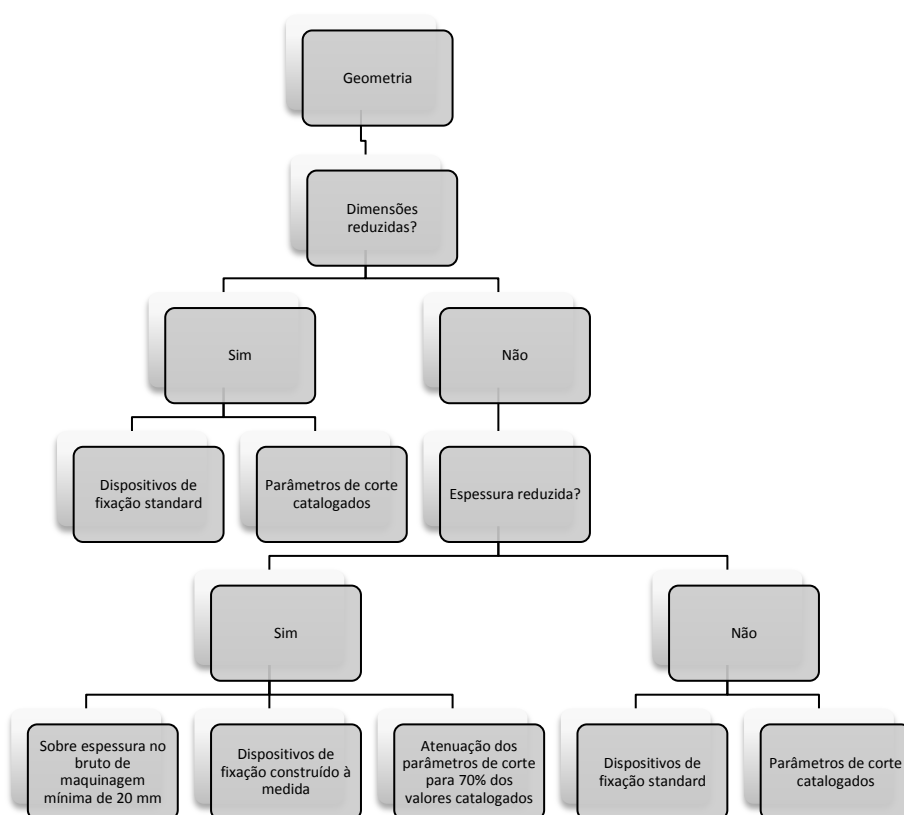


Figura 66: Diagrama de decisão da preparação de trabalho quantificado

Trabalho futuro

O presente trabalho permitiu abrir caminho para a programação CAM a 3 eixos no *software CATIA V5*. No entanto, os mais modernos centros de maquinagem operam a 5 eixos. Dado que os pós processadores incorporados no software apenas permitem o pós processamento a 3 eixos, torna-se imperativo o desenvolvimento de um que seja capaz de processar os 5 eixos.

Outro ponto interessante seria a da otimização dos parâmetros e estratégias de maquinagem utilizados para maquinar as geometrias aqui apresentadas. Apesar de ter sido feita alguma otimização no campo das trajetórias, o uso de *softwares* de simulação, tais como o *VERICUT*, permitem a redução de tempo de maquinagem, contribuindo para menores custos de fabrico das peças, diretamente relacionados com o tempo de operação da máquina. Também os parâmetros de corte poderão ser otimizados, nomeadamente a profundidade de corte, velocidade de avanço e velocidade de corte. Para o primeiro, deverão ser testadas várias profundidades e verificar o comportamento das ferramentas. Para os últimos dois, a otimização destes valores estará diretamente ligado à capacidade da máquina, quer em termos de velocidade de avanço, quer em termos de velocidades de rotação da bucha. O centro de maquinagem utilizado estava limitado às 8000 RPM pelo que, aumentada essa velocidade de rotação para valores superiores, tornaria possível aumentar a velocidade de avanço e de corte, reduzindo em muito o tempo de maquinagem de cada componente.

6. Referências Bibliográficas

- [1]<http://www.embraer.com/pt-BR/ConhecaEmbraer/TradicaoHistoria/Paginas/Home.aspx>, visto em 24/03/2013
- [2]<http://www.embraer.com/pt-BR/ConhecaEmbraer/EmbraerNumeros/Paginas/Home.aspx>, visto em 24/03/2013
- [3]<http://www.embraer.com/pt-BR/ConhecaEmbraer/PresencaGlobal/Paginas/Home.aspx>, visto em 24/03/2013
- [4]Alloy 7050 sheet and plate, ALCOA
- [5] WALSH, Ronald A.; CORMIER, Denis, Machining and metalworking handbook, McGraw-Hill, 2005
- [6] DAVIM, J. Paulo, Machining, Fundamentals and recent advances, Springer, 2008
- [7] RODRIGUES, Jorge, Fresagem, Folhas da cadeira de maquinagem
- [8] <http://en.wikipedia.org/wiki/CATIA>, visto em 29/03/2013
- [9] CHILDS, Thomas; MAEKAWA, Katsuhiko; OBIKAWA, Toshiyuki; YAMANE, Yasuo, Metal machining, Theory and applications, Arnold, 2000.
- [10] OKADA, Masato, HOSOKAWA, Akira, TANAKA, Ryutaro, UEDA, Takashi, Cutting performance of PVD-coated carbide and CBN tools in hardmilling, International journal of machining tools & manufacture
- [11] SIVASAKTHIEVEL, P.S.; MURUGAN, V.; SUDHAKARAN, R; Prediction of tool wear from machining parameters by response surface methodology in end milling; International journal of engineering science and technology.
- [12] LUO, Q.; ROBINSON, G.; PITTMAN, M.; HOWARTH, M.; SIM, W.-M.; STALLY, M.R.; LEITNER, H.; EBNER, R.; CALISKANOGLU, D.; HOVSEPIAN, P. E.; Performance of nano-structured PVD coating TiAlN/VN in dry high speed milling of aerospace aluminium 7010-T7651, Elsevier
- [13] KHORASANI, Amir Mahyar, YAZDI, Mohamed Reza Soleymani, SAFIZADEH, Mir Saeed, Tool life prediction in face milling machining of 7075 Al using artificial neural networks (ANN) and taguchi design of experiment (DOE), IACSIT international journal of engineering and technology, February 2011
- [14] GHIONE, Ionut; GHIONE, Adrian, Optimization by simulation of surface machining on CNC machine tools using CAD-CAM techniques; international multidisciplinary conference.
- [15] Catálogo de fresas do fabricante DORMER
- [16]http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/tool_holding_machines/application_overview/tool_holding/tool_holding_milling/Pages/default.aspx, visto em 10/06/2013
- [17] Catálogo Evolution N: Fresado eficiente del aluminio”.

[18]HARIK,Ramy; CAPPONI, Vincent; LOMBARD, Muriel; RIS, Gabriel; Enhanced functions supporting process planning for aircraft structural parts

7. Anexos

Anexo 1

O presente anexo pretende demonstrar como proceder para a realização de um CAM de uma peça a ser maquinada a 3 eixos.

A peça a maquinar é a tampa referida no presente documento, que foi maquinada quer em plástico, quer em alumínio. Este anexo irá explicar os procedimentos tomados para o CAM da tampa em alumínio.

Antes de pensar como se irá proceder à maquinagem da peça há que realizar alguns passos tais como:

- Definição do pós processador a utilizar: Deverá seguir-se o seguinte caminho:

Tools-options-machining-output

Neste separador basta selecionar qual o pós processador a utilizar. Neste caso foi utilizado o pós processador da IMS.

- Definição da máquina a utilizar: deverá selecionar-se o separador “*part operation*” aparecendo o seguinte *menu*:

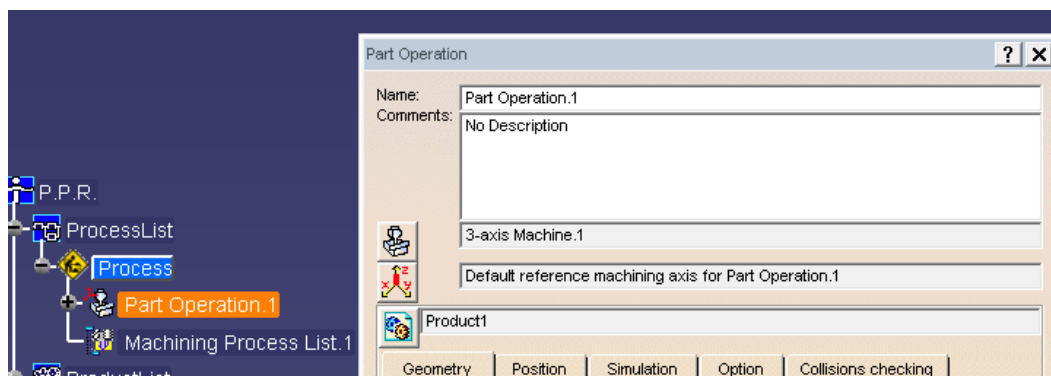


Figura 67: Menu de definição de hardware

Neste menu é possível definir:

- O tipo de máquina a utilizar:



Figura 68: Seleção de uma fresadora de três eixos

- O controlador a utilizar:

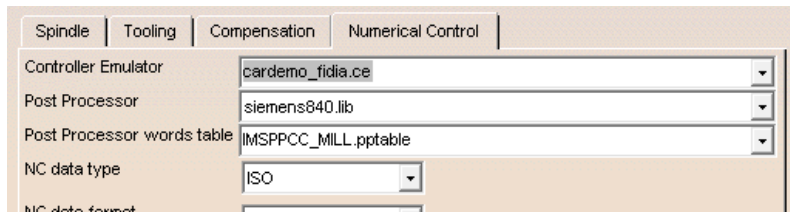


Figura 69: Definição do controlador, bem como da biblioteca de pós processador e tipo de ficheiro NC

- A peça e o bruto de maquinagem:

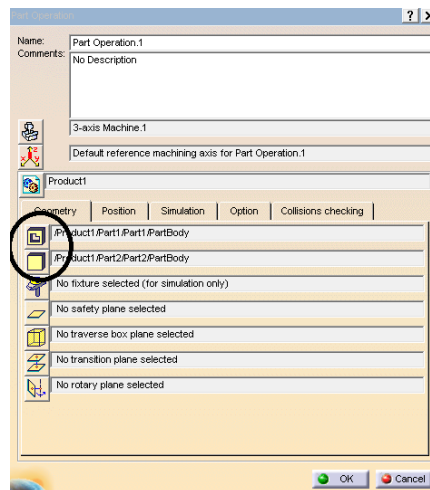


Figura 70: Definição da peça e do bruto de maquinagem

Neste menu, basta selecionar cada um dos ícones e selecionar a peça ou o bruto de maquinagem, conforme a opção que se seleciona.

Neste momento, o programa já conhece:

- A máquina a utilizar e as suas limitações físicas (3 eixos);
- O pós processador a utilizar;
- O controlador para o qual deverá gerar o ficheiro NC;
- A peça e o bruto de maquinagem.

Agora já é possível começar a programar as trajetórias da ferramenta.

A geometria modelada foi a seguinte:

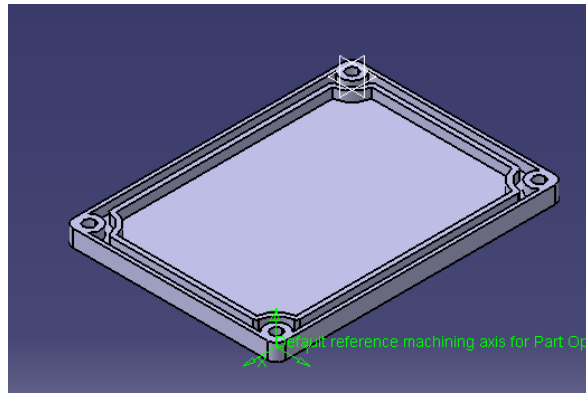


Figura 71: Geometria a maquinar

A geometria pode ser obtida usando 4 operações básicas:

- Facejamento;
- Desbaste;
- Abertura de caixa;
- Furação.

A primeira operação a realizar é a operação de facejamento. O objetivo será o de uniformizar a superfície superior garantindo que esta se encontra plana. Deste modo, selecciona-se o ícone de facejamento, o que fará aparecer o seguinte menu interativo:

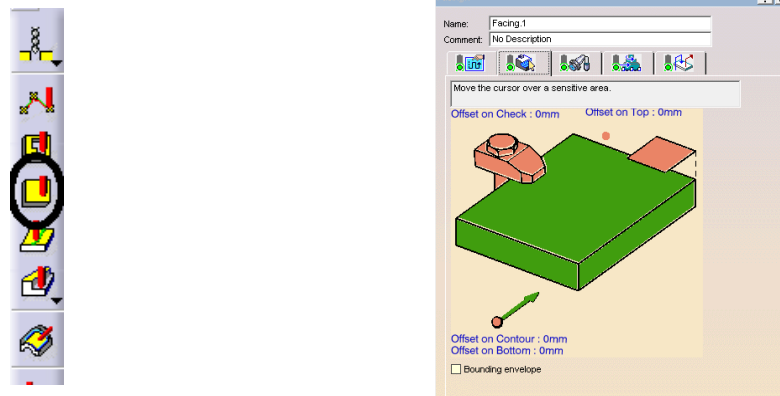


Figura 72: à esquerda, ícone de facejamento; á direita, menu interativo da operação de facejamento

Para realizar a operação de facejamento bastará seleccionar a face superior do bloco verde da figura acima, seleccionando em seguida a face superior da caixa. Deste modo, o programa conhece qual a face que deve maquinar bem como a espessura que deve maquinar (dado que o bruto de maquinagem se encontra definido). Nos restantes separadores podemos seleccionar:

- Parâmetros de maquinagem (estratégias, profundidades de corte, etc);
- Ferramentas;
- Velocidades de corte e de avanço;
- Alteração de trajetória das ferramentas.

Pressionando o ícone , o software calcula as trajetórias de maquinagem:

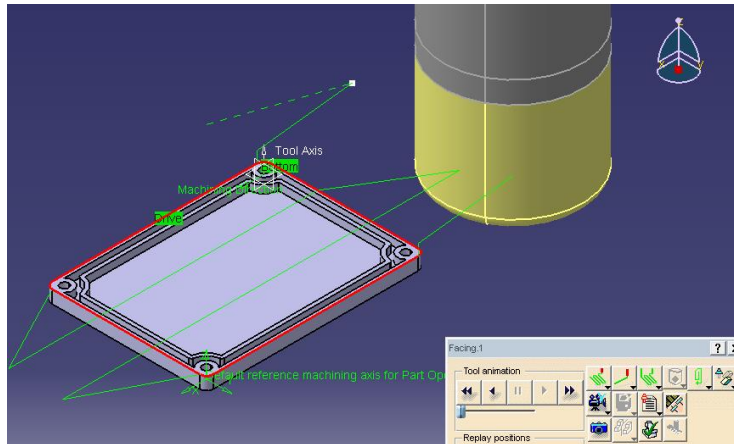


Figura 73: Trajetórias de maquinagem geradas pelo programa para a operação de facejamento

Após a realização desta operação, podemos proceder à realização de uma nova operação. Muito importante é notar que, para que a operação seguinte seja realizada após o facejamento, a operação de facejamento deverá estar selecionada.

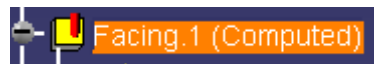


Figura 74: Operação de facejamento selecionada

Para garantir o paralelismo de todas as faces, é aconselhável que se faça um desbaste lateral ao bruto de maquinagem. Esta operação também será necessária para realizar os cantos da peça. Como esta peça é uma peça de teste, foi utilizada a operação de desbaste (*Roughing*). No entanto, esta operação deixa uma sob espessura de material cujo objetivo é que seja removido com uma operação diferente. Para se obter a dimensão real da peça, poderiam ser utilizadas as seguintes operações:

- *Sweeping*;
- *Profile contouring*.

Para a realização da operação de desbaste, basta selecionar o respetivo ícone e o menu da operação de desbaste surge:

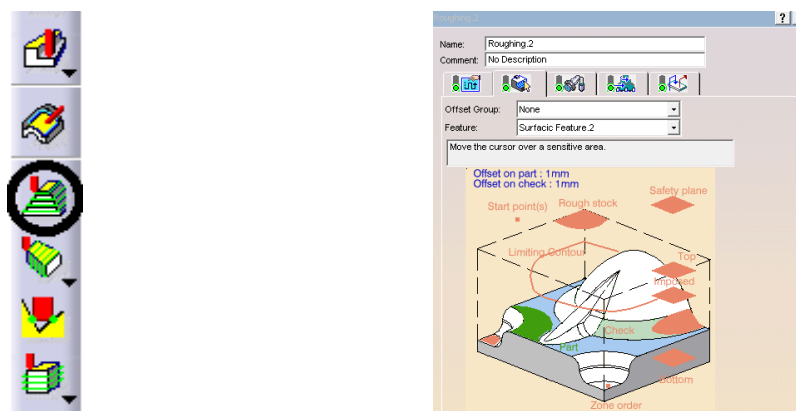


Figura 75: Ícone da operação de desbaste e respetivo menu

Tal como na operação de facejamento, o menu é interativo, bastando selecionar a área a verde da figura acima (originalmente, a cor é vermelha, passando a verde quando a peça

está definida) e selecionando a peça. Deste modo, o programa conhece qual é a geometria da peça (conhecendo também de antemão o bruto de maquinagem). Apesar de dispor de várias opções de seleção, basta definir a peça para que o programa calcule as trajetórias de maquinagem. Tal como na operação de facejamento, os restantes separadores são referentes a parâmetros, ferramenta e otimização das trajetórias da ferramenta. Pressionando o ícone de cálculo das trajetórias de maquinagem, obtém-se o seguinte padrão:

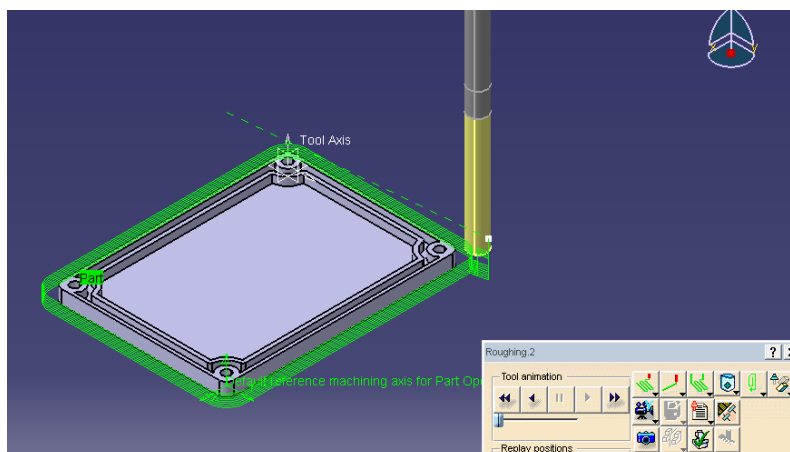


Figura 76: Trajetórias calculadas para a operação de desbaste

Neste ponto, a geometria exterior da peça ficou completamente definida. Basta agora proceder-se à abertura das caixas central e periférica, bem como a realização dos furos.

Para a realização da caixa central e periférica, o procedimento a realizar é semelhante pelo que apenas vai ser descrito o procedimento para a abertura da caixa central. Para selecionar a operação de abertura de caixa (*pocketing*), seleciona-se o seguinte ícone, aparecendo o respetivo menu da operação:

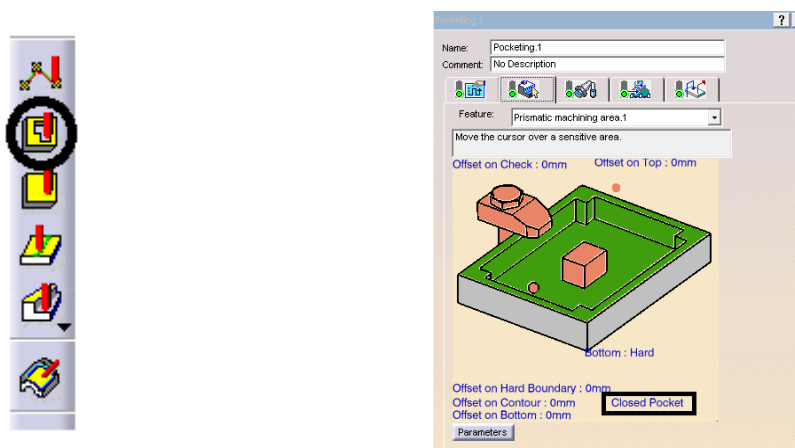


Figura 77: ícone de abertura de caixa e respetivo menu interativo

De notar que, no caso particular desta caixa, se deve selecionar a opção “*closed pocket*”. Para se proceder ao cálculo das trajetórias de maquinagem, basta selecionar-se na figura interativa a face de baixo da caixa da figura interativa e selecionar a face de baixo da peça a maquinar, procedendo-se de forma semelhante para selecionar o topo superior da

caixa. Deste modo, o programa conhece a geometria da caixa a cortar, bem como a sua profundidade, podendo agora proceder-se ao cálculo das trajetórias de maquinagem:

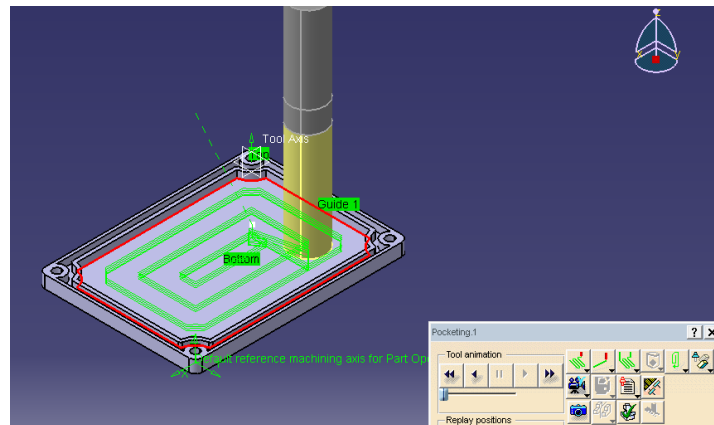


Figura 78: Trajetórias de maquinagem da operação de abertura de caixa

Para a caixa periférica, o procedimento a realizar é semelhante.

Para a caixa estar concluída basta agora realizar as operações de furação. Para tal, basta seleccionar o ícone de furação, aparecendo o seguinte menu interativo:

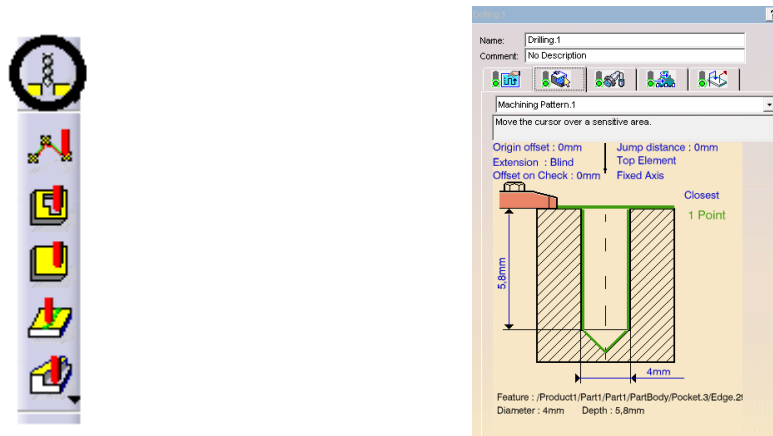


Figura 79: Ícone de furação e menu interativo

Para realizar o furo basta seleccionar o topo superior da imagem interativa e definir o topo superior do furo na peça, procedendo-se de modo semelhante para a parede do furo e o fim do furo. Deste modo, o programa conhece a geometria do furo, podendo agora calcular as trajetórias da ferramenta:

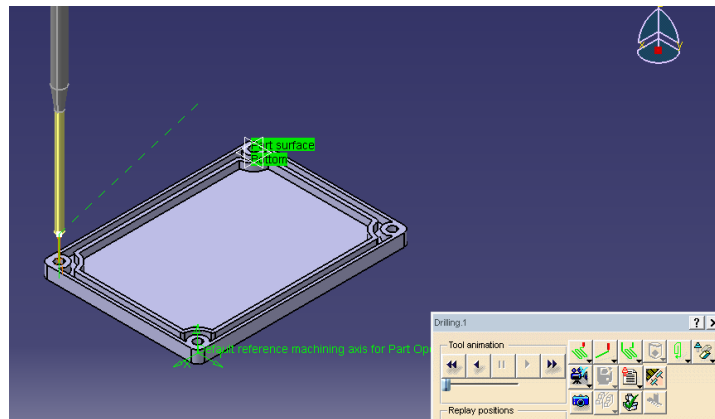


Figura 80: Trajetória calculada para o furo

De modo semelhante se procede para os restantes três furos. Tendo em conta que os furos são todos iguais, poder-se-ia seleccionar as paredes dos furos e os respetivos fundos numa única operação.

Estando todas as trajetórias definidas, basta apenas agora gerar o ficheiro NC. Para gerar este ficheiro basta clicar com o botão direito do rato sobre o separador “*manufacturing program.1*” e seguir o caminho:

Manufacturing program.1 object- generate NC code interactively

O seguinte menu irá aparecer:

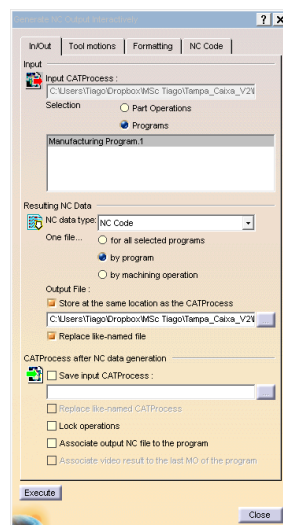


Figura 81: Menu de geração de código NC

Como no início se definiu qual o pós processador a utilizar bem como o controlador, basta apenas escolher a pasta de destino do ficheiro NC (é gerado um ficheiro.TXT) e premir o botão “*execute*”.

Anexo 2

O presente anexo tem como objetivo mostrar como forçar o CATIA V5 a escrever linhas de código definidas pelo utilizador, mesmo que o pós processador não as defina automaticamente.

Para tal, de modo a que determinada ação aconteça forçosamente, deverá seleccionar-se a operação que deverá ser afetada:

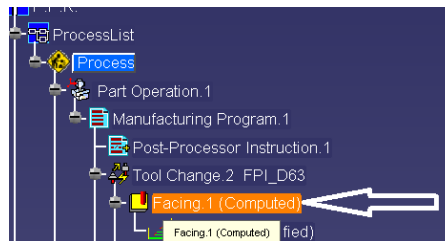


Figura 82: Exemplo de seleção de operação

Quando a operação estiver seleccionada, deverá premir-se o icon de “post-processor instruction”:



Figura 83: Icon de instrução de pós processador

Selecionando este icon, é agora possível adicionar instruções referentes a esta operação, utilizando a seguinte sintaxe:

INSERT xxxxxxxx

Caso apenas se deseje adicionar um comentário para identificar a operação, ou ligar o líquido refrigerante da máquina ou, no final do programa, forçar a ferramenta que está a ser utilizada a ser guardada no armazém das ferramentas, utiliza-se este procedimento para forçar o programa a escrever essas instruções no ficheiro pós processado.

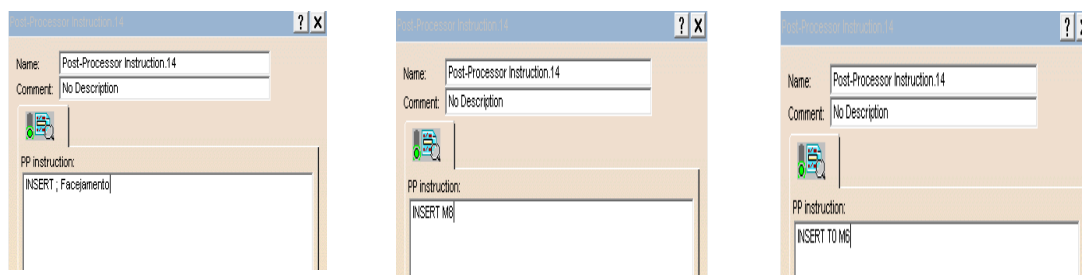


Figura 84: Instruções típicas para serem escritas em ficheiros pós processados (à esquerda, comentário; ao centro, liga refrigeração; à direita, força ferramenta a ser arrumada no fim do programa)

Há que ter em atenção que as instruções devem ser adicionadas nas operações que lhes dizem respeito. Por exemplo, a instrução de arrumar ferramenta apenas deverá ser utilizada no fim do programa, enquanto que a instrução de ligar a refrigeração deverá ser escrita em todas as operações de maquinagem programadas.

Anexo 3

O presente anexo tem por objetivo demonstrar como corrigir as trajetórias de maquinagem que são originadas automaticamente pelo CATIA V5.

A imagem seguinte mostra o menu do processo, onde se deverá seleccionar o último separador.

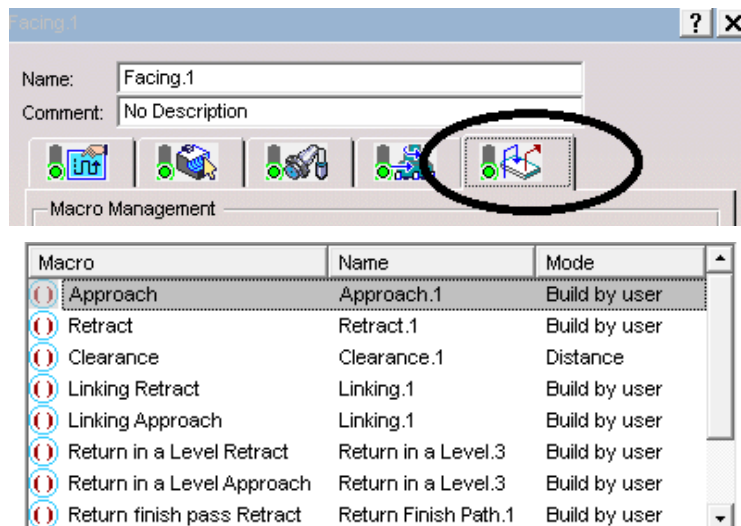


Figura 85: Menu do processo e opções apresentadas

As opções apresentadas permitem alterar a trajetória da ferramenta, aquando da sua aproximação, retração ou mesmos a maneira como a ferramenta se aproxima e afasta da peça entre níveis de maquinagem (no caso da abertura de caixa, vários níveis tiveram de ser definidos, de modo a definir o valor da profundidade de corte).

Com o botão direito do rato, selecionamos a opção “*activate*”, sendo agora possível alterar as várias opções de trajetórias disponíveis para o movimento que se pretende alterar:

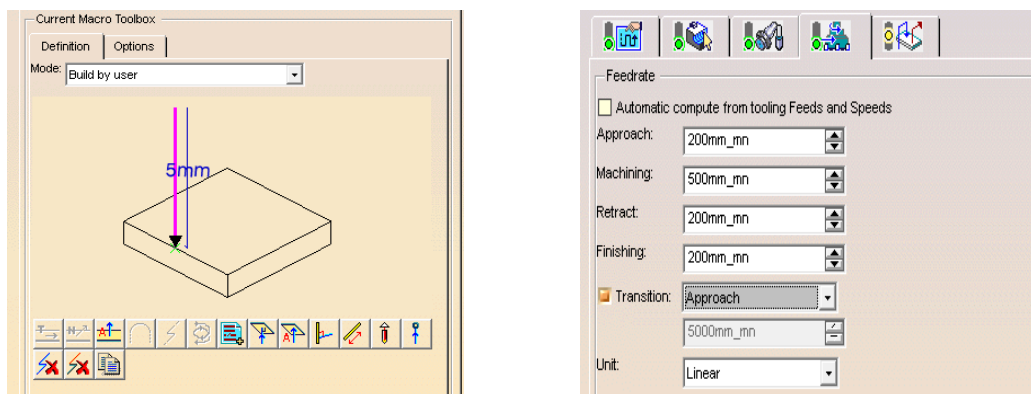


Figura 86: Definição de nível de segurança e definição da velocidade de aproximação

Neste caso concreto, decidiu-se atribuir à ferramenta uma distância da peça de 5 mm, a partir da qual a ferramenta se deslocará com uma velocidade de avanço definida pelo

utilizador. Esta velocidade de avanço é definida no separador seguinte, ativando a opção “*transition*” e definindo a velocidade de aproximação (“*approach*”). Deste modo, a ferramenta não se aproxima da peça na velocidade de avanço rápido mas sim na velocidade que o utilizador definir. Da mesma forma, ao definir-se a retração da ferramenta da mesma forma, garante-se que esta não colide com a peça, dado que estamos a obrigar a ferramenta a deslocar-se na vertical até uma certa distância, definida pelo utilizador. A velocidade de afastamento da ferramenta pode ser definida como a velocidade rápida da máquina. Para tal basta selecionar, com o botão direito do rato a seta rosa (que se pode ver na figura 3), selecionando a opção “*feedrate*” e definindo a velocidade como “*rapid*”.

A utilização destas indicações permite corrigir os problemas de aproximação da ferramenta na diagonal (caso verificado na furação) e de aproximação rápida da ferramenta verificada.

Para corrigir a trajetória da ferramenta na operação de abertura de caixa, o processo é muito semelhante. No entanto, A trajetória a definir não será vertical mas sim em rampa. Deste modo, seleciona-se a seguinte opção:

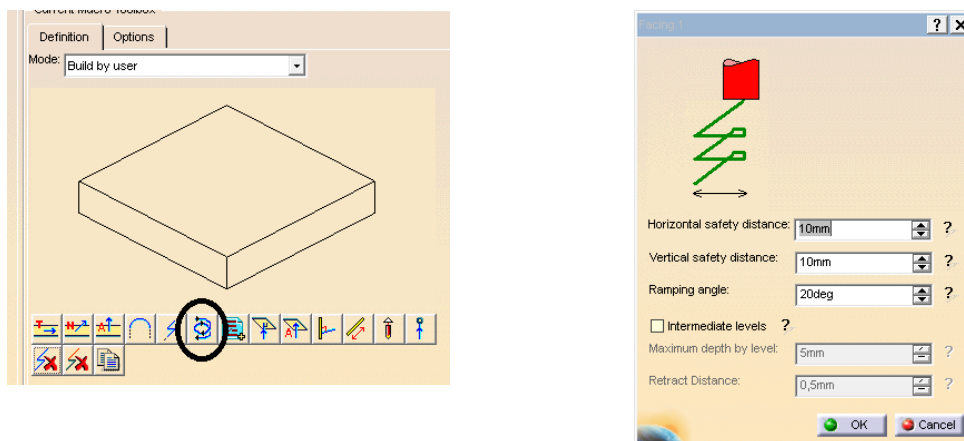


Figura 87: Seleção da trajetória em rampa e definição dos seus parâmetros

Após a seleção deste *icon*, podemos definir o comprimento da rampa e o ângulo que esta faz com a horizontal. De notar que estes parâmetros deverão ser utilizados cada vez que há uma aproximação da ferramenta. Deste modo, deverão utilizar-se esta trajetória em rampa nos seguintes campos:

- *Approach*;
- *Linking approach*;
- *Return in a level approach*;
- *Return finish pass approach*;
- *Return between levels approach*.

Deste modo, garantimos que todas as trajetórias feitas em aproximação da ferramenta são feitas em rampa, com os parâmetros definidos pelo utilizador, resolvendo assim o problema de aproximação da ferramenta na operação de abertura de caixa.

Anexo 4

As ligas de alumínio da família 7000, em especial a liga 7050 são largamente utilizadas pela indústria aeronáutica, por apresentarem a melhor combinação entre resistência mecânica, resistência à corrosão e tenacidade à fratura [4].

Esta liga está disponível em vários estados de têmpera, nos quais se destacam: T7651, que tem uma maior resistência mecânica com uma boa resistência à corrosão e uma resistência à corrosão por picadas mediana; T7451, com uma melhor resistência à corrosão por picada, mas com uma resistência mecânica ligeiramente inferior à T7651.

Esta liga é tipicamente utilizada em fuselagens de aviões e asas (e em peças que, no geral, apresentem espessuras elevadas).

A composição química da liga 7050 é apresentada na seguinte tabela:

Tabela 29: Composição química da liga de alumínio 7050 [4]

Zn	Cu	Mg	Zr	Mn	Si	Fe	Ti	Al
6.7%	2.5%	2.3%	0.12%	0.1%	0.12%	0.13%	0.06%	REST

No que diz respeito às propriedades mecânicas da liga, estas encontram-se sintetizadas na seguinte tabela:

Tabela 30: Propriedades mecânicas da liga 7050 [4]

Liga	7050 T7651	7050T7451
<u>Tensão de rotura</u>	<u>524 MPa</u>	<u>483-510 MPa</u>
<u>Tensão de cedência</u>	<u>455 MPa</u>	<u>414-441MPa</u>
<u>Extensão (%)</u>	<u>7-8</u>	<u>4-9</u>

Estes valores serão utilizados para a seleção de ferramentas de corte apropriadas.

Anexo 5

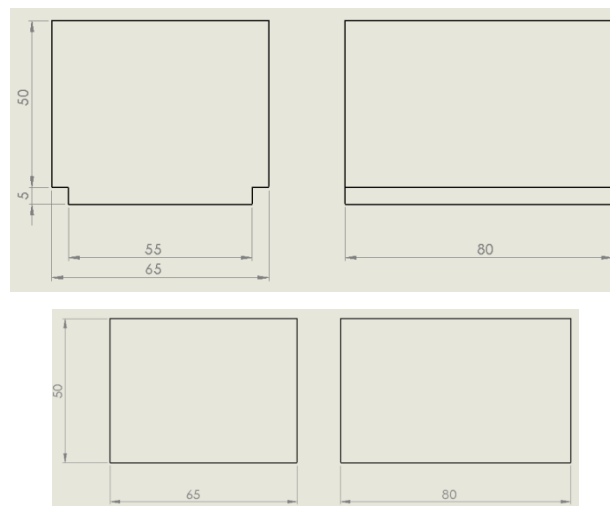
Definidas as várias soluções possíveis para fixar os brutos de maquinagem à máquina, é necessário então definir agora a sua geometria, que irá variar consoante a peça que se quer maquinar. Deste modo, o objetivo deste anexo é mostrar, para cada geometria, como seriam os brutos de maquinagem para cada solução proposta.

Geometria 1

Para maquinar a geometria 1, as três soluções propostas de fixação levam a três diferentes brutos de maquinagem:

1. **Fixação por prensa mecânica:** Esta solução implica a abertura de rasgos laterais para garantir que os lados em contacto com a prensa estejam perfeitamente paralelos. Deste modo, o bruto deverá ter uma altura superior para permitir a abertura desses rasgos.
2. **Fixação por adesivo:** Esta solução irá implicar o fabrico de uma mesa sacrificial, que seria fixa à máquina por ligação aparafusada. O bruto de maquinagem seria então fixo à máquina recorrendo a um adesivo forte. Em termos de preparação da matéria prima, esta solução é a que implica menos apertos, apesar de necessitar do fabrico de uma mesa sacrificial.
3. **Fixação por ligação aparafusada:** Esta solução implica o fabrico do bruto de maquinagem com abas laterais que seriam furadas para fixação à máquina. Num aperto posterior, o material em excesso seria removido em fresadora convencional.

Esta solução tem como grande inconveniente a exigência de uma preparação demorada do bruto de maquinagem bem como um elevado número de apertos.



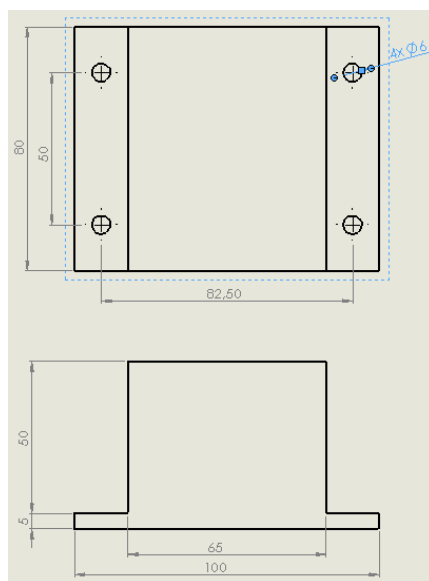


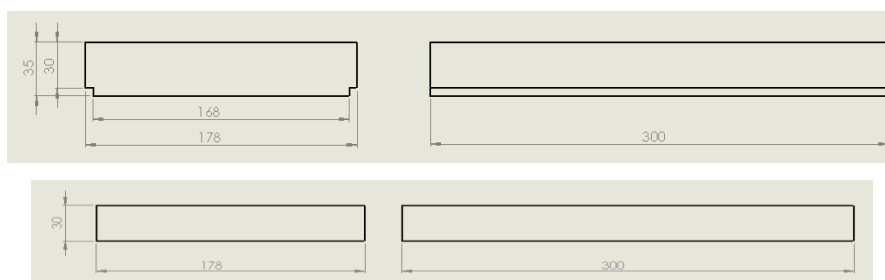
Figura 88: Definição dos brutos para fixação em prensa, fixação por adesivo e fixação por ligação aparafusada

Geometria 2

Para maquinar a geometria 2, as três soluções propostas de fixação levam a três diferentes brutos de maquinação:

1. **Fixação por prensa mecânica:** Equivalente ao que foi explicitado nas geometrias 1 e 2.
2. **Fixação por adesivo:** Equivalente ao que foi explicitado nas geometrias 1.
3. **Fixação por ligação aparafusada:** Equivalente ao que foi explicitado nas geometrias 1.

De um modo geral, verifica-se que a solução mais simples seria a da fixação do bruto de maquinação por adesivo. Tal solução implicaria o fabrico de uma mesa sacrificial, que seria fixa à mesa da máquina através de ligações aparafusadas. No entanto, não existindo uma mesa já fabricada e sendo que apenas se irá maquinar um exemplar de cada geometria, então é mais prático e poupa mais material a utilização da solução 1. Deste modo, o desperdício de material não será tão grande dado que apenas uma porção do material da base será desperdiçada. Os desenhos esquemáticos dos vários brutos de maquinação podem ser vistos na figura seguinte:



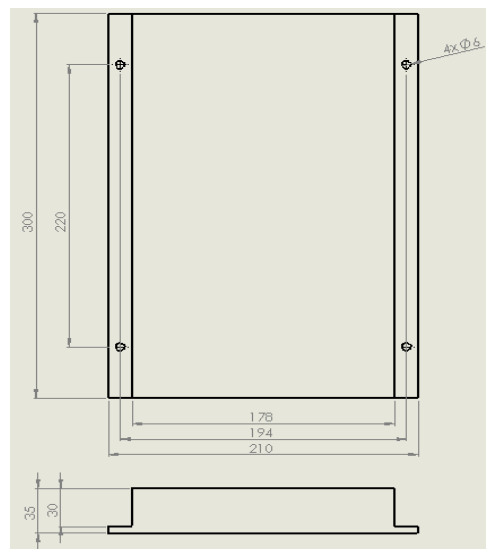


Figura 89: Definição dos brutos para fixação em prensa, fixação por adesivo e fixação por ligação aparafusada